

# Fondements d'économie des ressources forestières

Gauthier Ligtot

4 février 2025



# Remerciements

Ce document a été, dans un premier temps au moins, largement inspiré du cours d'économie du patrimoine forestier et naturel dispensé par Jacques Hébert (Gembloux Agro-Bio Tech, ULiège) qui lui même s'était inspiré des notes de cours rédigées par Jean-Luc Peyron (ENGREF). Plusieurs illustrations et exercices proviennent directement des ces ouvrages. Un tout grand merci également à Marie Fombona et Jacques Hébert pour leur relecture attentive ainsi qu'aux étudiants ayant commenté le document et proposé des corrections.



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Capital et revenus forestiers</b>	<b>13</b>
2.1	La valeur d'une forêt . . . . .	13
2.1.1	La valeur économique totale . . . . .	15
2.1.2	La valeur d'échange d'une forêt . . . . .	16
2.2	Les acteurs . . . . .	21
2.3	Les revenus . . . . .	22
2.3.1	Sources de revenus . . . . .	22
2.3.2	Prix des bois . . . . .	25
2.4	Les coûts . . . . .	28
2.5	Echéancier . . . . .	31
2.6	Le traitement du temps . . . . .	33
2.6.1	La valeur du temps . . . . .	33
2.6.2	Les intérêts composés . . . . .	34
2.6.3	L'actualisation . . . . .	35
2.6.4	Investissement et désinvestissement . . . . .	36
2.6.5	La valeur actuelle nette . . . . .	37
2.6.6	Valeur actuelle nette à perpétuité . . . . .	38
2.7	Les risques, incertitudes et résilience . . . . .	42
2.7.1	Sources de risques et d'incertitudes . . . . .	43
2.7.2	Définition du risque . . . . .	43
2.7.3	Définitions de la résilience . . . . .	44
2.7.4	Indicateurs de performance de projets risqués . . . . .	45
2.7.5	Aversion aux risques . . . . .	48
2.7.6	Adaptation aux risques . . . . .	49
2.7.7	Remarques supplémentaires . . . . .	49
2.7.8	Illustration . . . . .	49
2.8	Résumé . . . . .	52
2.9	Exercices . . . . .	53
2.9.1	Exercice 1 . . . . .	53

2.9.2	Exercice 2 . . . . .	53
2.9.3	Exercice 3 . . . . .	53
2.9.4	Exercice 4 . . . . .	54
2.9.5	Exercice 5 . . . . .	54
<b>3</b>	<b>Valeur des services marchands</b>	<b>55</b>
3.1	Méthodes d'estimation de la valeur vénale . . . . .	55
3.2	Introduction aux traitements sylvicoles . . . . .	56
3.3	Futaie régulière avec coupe à blanc . . . . .	56
3.3.1	Valeur au cours du cycle de production . . . . .	58
3.3.2	Conventions d'écriture . . . . .	59
3.3.3	Formule de la valeur par récurrence . . . . .	60
3.3.4	Valeur en bloc . . . . .	64
3.3.5	Illustration . . . . .	66
3.4	Futaie équiennne sans coupe à blanc . . . . .	68
3.4.1	Cycle de production . . . . .	68
3.4.2	Illustration . . . . .	70
3.5	Futaie inéquiennne à l'équilibre . . . . .	72
3.5.1	Cycle de production . . . . .	74
3.5.2	Illustration . . . . .	75
3.6	Futaie en transition . . . . .	76
3.6.1	Cycle de production . . . . .	76
3.6.2	Illustration . . . . .	78
3.7	Résumé . . . . .	80
3.8	Exercice . . . . .	82
3.8.1	Exercice 1 . . . . .	82
3.8.2	Exercice 2 . . . . .	83
3.8.3	Exercice 3 . . . . .	83
<b>4</b>	<b>Indicateurs de gestion</b>	<b>85</b>
4.1	Indicateurs de production et d'accumulation . . . . .	86
4.2	Valeur actuelle nette . . . . .	86
4.3	Valeur actuelle nette avec immobilisation . . . . .	87
4.4	Valeur actuelle nette à perpétuité . . . . .	88
4.5	Rapport bénéfice-coût . . . . .	88
4.6	Retour sur investissement . . . . .	89
4.7	Taux interne de rentabilité . . . . .	90
4.8	Annuité . . . . .	91
4.9	Illustrations . . . . .	96
4.9.1	Calculs des indicateurs . . . . .	96
4.9.2	Estimation de la révolution optimale . . . . .	97

4.10	Résumé . . . . .	103
4.11	Exercices . . . . .	103
4.11.1	Exercice 1 . . . . .	103
4.11.2	Exercice 2 . . . . .	105
4.11.3	Exercice 3 . . . . .	106
4.11.4	Exercice 4 . . . . .	107
4.11.5	Exercice 5 . . . . .	108
4.11.6	Exercice 6 . . . . .	109
<b>5</b>	<b>Taux d'actualisation</b>	<b>111</b>
5.1	Définition . . . . .	112
5.2	Justification . . . . .	112
5.2.1	Préférence pure pour le présent . . . . .	113
5.2.2	Effet de richesse . . . . .	114
5.2.3	Effet de précaution . . . . .	115
5.2.4	Particularités des biens et services environne- mentaux . . . . .	115
5.2.5	Risques . . . . .	116
5.2.6	Coût d'opportunité du capital . . . . .	117
5.3	Inflation et intérêt . . . . .	118
5.3.1	Inflation . . . . .	118
5.3.2	Taux d'intérêt bancaire . . . . .	118
5.3.3	Taux d'emprunt à long terme . . . . .	121
5.4	Valeurs de référence . . . . .	123
5.4.1	Taux appliqués par des institutions commerciales	124
5.4.2	Recommandations publiques . . . . .	124
5.4.3	Taux d'actualisation décroissant . . . . .	125
5.4.4	Taux d'actualisation nul . . . . .	126
5.5	Choix pour un projet forestier . . . . .	126
5.6	Résumé . . . . .	127
5.7	Exercices . . . . .	127
5.7.1	Exercice 1 . . . . .	127
5.7.2	Exercice 2 . . . . .	128
5.7.3	Exercice 3 . . . . .	128
<b>6</b>	<b>Valeur potentielle et martelage</b>	<b>129</b>
6.1	Introduction . . . . .	129
6.2	Valeur de consommation . . . . .	130
6.3	Gain annuel . . . . .	131
6.4	Taux de fonctionnement . . . . .	132
6.5	Valeur potentielle . . . . .	133

6.6	Aggrégation à l'échelle du peuplement . . . . .	133
6.7	Valeurs de référence . . . . .	135
6.8	Prise en compte du risque . . . . .	136
6.8.1	Perturbation . . . . .	136
6.8.2	Risque d'altération du bois . . . . .	136
6.9	Résumé . . . . .	137
6.10	Exercices . . . . .	138
6.10.1	Exercice 1 . . . . .	138
<b>7</b>	<b>Biens et services multiples</b>	<b>139</b>
7.1	Introduction . . . . .	139
7.2	Biens et services non marchands . . . . .	140
7.2.1	Théorie . . . . .	140
7.2.2	Evaluation contingente . . . . .	142
7.2.3	Coût de déplacement . . . . .	143
7.2.4	Autres méthodes . . . . .	146
7.3	Multiple services écosystémiques . . . . .	146
7.3.1	Modèle de Hartman . . . . .	146
7.3.2	Analyse coût-bénéfice . . . . .	147
7.3.3	Front de Pareto . . . . .	148
7.3.4	Matrice des services écosystémiques . . . . .	149
7.3.5	Analyses multi-critères . . . . .	151
7.4	Evaluation des arbres d'agrément . . . . .	153
7.4.1	Coût de remplacement . . . . .	153
7.4.2	Evaluation au travers d'un score multi-critère . . . . .	155
7.5	Résumé . . . . .	156
7.6	Exercice . . . . .	157
7.6.1	Exercice 1 . . . . .	157
7.6.2	Exercice 2 . . . . .	157

# Chapitre 1

## Introduction

History is a branch of mathematics. So is literature. Economics is a branch of religion.

---

(Haig, 2014, page 262)

L'économie des ressources forestières est la discipline qui étudie la production, la distribution, l'échange et la consommation des biens et services produits par la forêt. C'est donc une discipline qui étudie le comportement de différents acteurs au regard de ressources forestières.

Cette discipline fait donc partie, au moins partiellement, des sciences comportementales. Contrairement à d'autres disciplines, peut-être mieux maîtrisées par les ingénieurs (ex. physique, chimie), les lois utilisées, bien que parfois décrites à l'aide d'équations complexes, ne sont pas universelles et pas toujours détachées d'une idéologie dominante. L'homme n'est pas une machine et il agit de façon complexe, par exemple sous l'effet d'émotions. Pourtant, il sera fréquemment supposé que les décisions et actions des individus sont rationnelles et visent à atteindre des objectifs donnés. Autrement dit, il est supposé que la frénésie humaine d'obtenir et de dépenser ne résulte pas d'impulsions aléatoires, mais d'une réponse délibérée. Les producteurs maximisent le rendement net. Les consommateurs maximisent la satisfaction dans les limites de leur budget (Price, 1989, page 3). Cette démarche a moins pour objectif de prédire mais plutôt de comprendre et de questionner.

Il convient de reconnaître que les ressources forestières, comme

beaucoup d'autres ressources (ex. énergie, temps, ...) sont présentes en quantités limitées et il n'est pas possible d'augmenter ces ressources sans contreparties (ex. en diminuant les surfaces vouées aux productions agricoles). Ces ressources sont, en outre, précieuses à de multiples égards en délivrant une multitude de services et de biens. Ces derniers sont tellement nombreux qu'il a été nécessaire de les regrouper par catégories de services écosystémiques. Etant donné la rareté et la valeur de ces ressources, des choix s'imposent. Il est important d'utiliser de manière adéquate ces ressources pour répondre aux besoins divers et variés de la société actuelle et future. Il s'agit bien là de l'enjeu de l'économie des ressources forestières.

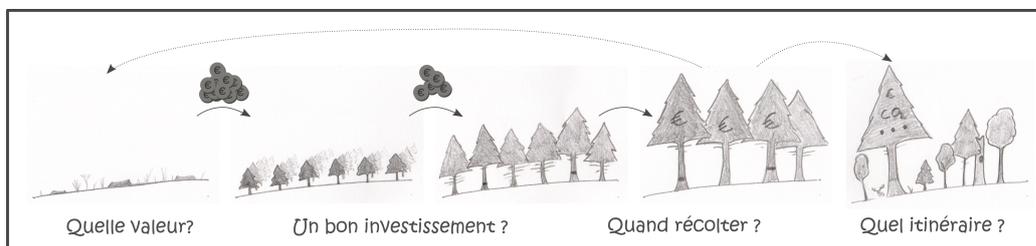
L'économie des ressources forestières peut être abordée à de multiples échelles : globale, régionale, locale. Par exemple, il paraît logique d'étudier le rôle de séquestration du carbone par les forêts à l'échelle globale, puisque c'est l'échelle de la problématique du changement climatique. Le développement de la filière bois et de la ressource disponible pour cette filière est logiquement étudiée à une échelle plus régionale (bien que des échanges globaux soient aussi possibles). Enfin, les décisions de sylviculteurs ou de propriétaires sont plutôt abordées à une échelle locale.

Les problématiques rencontrées à toutes ces échelles sont importantes et intéressantes. Néanmoins, dans le cadre de ce cours, nous aborderons surtout les problématiques telles que celles rencontrées à l'échelle locale, par exemple, celles rencontrées par un propriétaire ou un gestionnaire forestier à l'échelle locale. Nous tenterons surtout de donner des éléments permettant de guider les questionnements suivants (Figure 1.1) : Quelle est la valeur d'une forêt ? Est-ce que tel investissement forestier est rentable ? Quel est l'itinéraire sylvicole le plus avantageux ?

**Structure du document** Après avoir défini certains concepts fondamentaux (Chapitre 1), nous les appliquerons à des itinéraires de gestions forestières contrastées (Chapitre 2). Ensuite, nous définirons différents indicateurs permettant de comparer différents itinéraires de gestion (Chapitre 3) avant de revenir sur certaines hypothèses de calcul et de discuter de leur importance respectives (Chapitre 4).

Au cours de la lecture vous noterez que certaines sections ont été écrites avec une police plus petite. Il s'agit de sections conte-

nant des détails parfois assez pointus (démonstrations) et dont la compréhension n'est pas indispensable.



**FIGURE 1.1** – Exemple de questionnements fréquemment rencontrés par un gestionnaire forestier auxquels nous essayerons de répondre dans le cadre de ce cours.



# Chapitre 2

## Estimation du capital forestier et des revenus

Price is what you pay. Value is what you get.

---

Warren Buffett

### 2.1 La valeur d'une forêt

La valeur d'une forêt a de multiples définitions. Elle dépend de nombreux facteurs et reste une notion subjective.

Pour une personne privée, la valeur d'une forêt dépend notamment de ses qualités intrinsèques. On peut notamment citer des éléments objectifs et facilement identifiables tels que les caractéristiques des arbres et des peuplements qui peuvent permettre d'estimer les revenus futurs liés à la production de bois. On peut néanmoins aussi citer des éléments plus compliqués à évaluer et parfois plus subjectifs. Par exemple, une personne évaluera différemment une forêt si cette personne a déjà l'habitude de la parcourir depuis longtemps (beaucoup d'autres considérations d'ordre personnel semblables pourraient être envisagées). Deux personnes différentes peuvent donc évaluer différemment (et de manière légitime) la valeur d'un bien ou d'un service. En outre, une même personne, en fonction des circonstances, pourrait également évaluer différemment un bien ou un service. Par exemple, et de manière un peu caricaturale, des évaluations différentes pourraient être obtenues

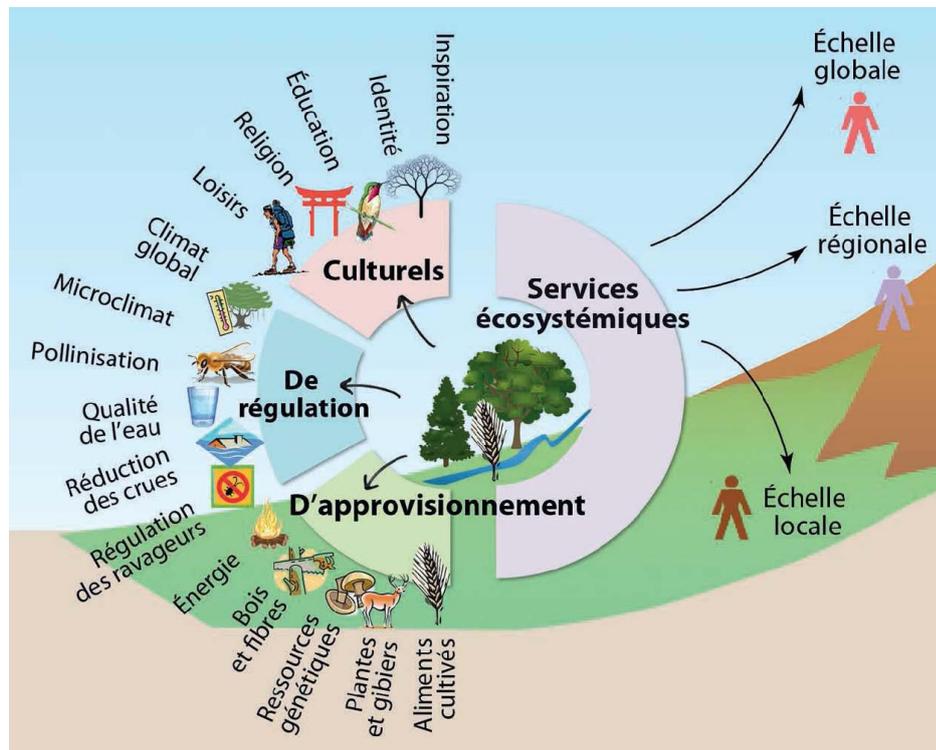


FIGURE 2.1 – Diversité des biens et services produits par les forêts.

si l'objectif de l'évaluation vise à impressionner un ami, à vendre un bien ou à effectuer des calculs fiscaux.

Une collectivité évalue différemment une forêt, en tenant compte des différents services écosystémiques rendus par la forêt : services d'approvisionnement (énergie, bois, gibier...), des services de régulation (stockage de carbone, protection contre l'érosion du sol, protection contre les avalanches ou les chutes de pierre, réduction des crues, microclimat) et/ou des services culturels (loisirs, religion... Figure 2.1).

Comme tous les autres biens, la forêt n'a pas une valeur unique qui s'impose à tous le monde (Bary-Lenger et al., 2002). Sa valeur dépend des caractéristiques et attentes des agents économiques concernés. Un vocable spécifique est utilisé dans la littérature pour distinguer différents cas de figure et distinguer les différentes composantes de la valeur d'une forêt.

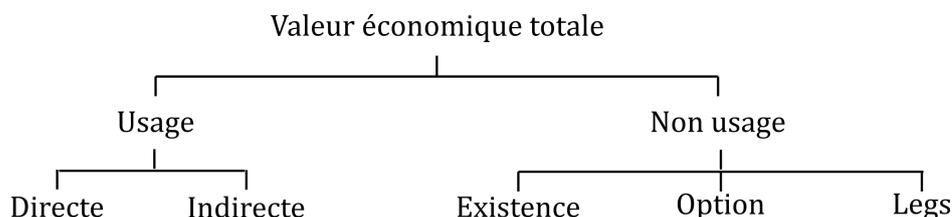


FIGURE 2.2 – Le concept et les composantes de la valeur totale économique.

### 2.1.1 La valeur économique totale

La valeur économique totale<sup>1</sup> est un concept de l'analyse coûts-bénéfices<sup>2</sup> qui fait référence à la valeur que des individus retirent d'une ressource naturelle, d'une ressource patrimoniale créée par l'homme ou d'un système d'infrastructure, par rapport à une situation sans cette ressource ou cette infrastructure. Elle est l'agrégation des différentes valeurs (basées sur les fonctions principales) fournies par un écosystème donné.

**Valeur d'usage et de non usage** La valeur économique totale d'une forêt peut être décomposée en une valeur d'usage<sup>3</sup> et une valeur de non usage<sup>4</sup>. La valeur d'usage est la satisfaction que retire un agent de son utilisation. La valeur de non usage est attribuée à la seule existence d'un bien ou d'un service par un agent qui n'en fera pas usage (altruisme).

**Valeur d'usage direct et indirect** Les valeurs d'usage peuvent être obtenues à partir de ressources extractibles (ex. bois, champignons, ...) ou de ressources non extractibles (ex. paysage). Il s'agit respectivement de valeurs directes et indirectes.

**Valeur d'option** Un agent peut attribuer une valeur à une ressource qui n'est pas utilisée aujourd'hui mais qui pourrait être utilisée dans le futur. Cela reflète la volonté de préserver une option pour une utilisation future potentielle. Il s'agit bien d'une utilisation future potentielle et une valeur d'option non nulle est possible

---

1. Total economic value, TEV  
 2. Cost-benefit analysis, CBA  
 3. Use value  
 4. Non use value

même si la probabilité d'utilisation future de la ressources est très faible.

**Valeur de legs** Un agent peut placer une valeur sur un actif afin de préserver cet actif en vue de son usage pour les générations futures.

**Valeur d'existence** Un agent peut placer une valeur sur un actif sans anticiper un usage futur mais simplement pour préserver une diversité biologique, une espèce, un écosystème.

### 2.1.2 La valeur d'échange d'une forêt

#### Définitions

La valeur d'échange d'une forêt correspond à son prix de vente. Son estimation est moins subjective que celle de la valeur économique totale. Elle est estimée de manière directe (par observation du marché) ou de manière indirecte (en posant un certain nombre d'hypothèses). La valeur d'échange d'une forêt dépend également de plusieurs composantes (Figure 2.3).

**Valeur vénale** La valeur vénale<sup>5</sup> d'une forêt est le prix qu'une personne accepte de payer ou de recevoir en échange de la propriété de cette forêt en l'absence de considérations subjectives ou de caractère d'urgence de la transaction. Cette valeur s'applique donc pour un agent (acheteur ou vendeur) "raisonnable" et en absence de considérations subjectives. Cette notion suppose l'achat ou la vente du bien. Idéalement, la valeur obtenue reflète les conditions du marché.

**Valeur d'aménité** La valeur d'aménité<sup>6</sup> est la valeur qui émerge des actifs non marchands. Il s'agit des qualités et caractéristiques naturelles ou physiques qui contribuent à l'appréciation par son caractère agréable, de sa cohérence esthétique et de ses attributs culturels et récréatifs. La valeur d'aménité peut être perçue à l'échelle individuelle ou collective. Souvent, seule la composante perçue à

---

5. Market value

6. Amenity value

l'échelle individuelle sera prise en compte dans le calcul de la valeur vénale et déterminera donc le prix de vente. La valeur d'aménité sera bien plus importante si elle est calculée pour une collectivité plutôt que pour un individu mais cette valeur collective ne sera, dans la plupart des cas, pas payée par un individu lors de l'achat d'une forêt.

**Valeur de convenance** Un acheteur n'est pas forcément rationnel. Certaines considérations personnelles peuvent le pousser à évaluer un bien différemment. La valeur de convenance<sup>7</sup> est la valeur qu'un propriétaire (ou acheteur) serait tenté d'attribuer à une forêt en prenant en compte des considérations personnelles et subjectives.

**Valeur technique** La valeur technique est la valeur qui émerge des actifs marchands de la forêt. Elle intègre la production à destination de la filière-bois, la chasse, les concessions diverses et la vente de tout autres produits de la forêt. La valeur technique d'une forêt a deux composantes : le fonds et la superficie.

**Valeur du fonds** Le fonds<sup>8</sup> est ce qu'il reste après la coupe de tous les arbres, c'est-à-dire le sol garni de son infrastructure (deserte, parcellaire, drainage ...) et de ses potentialités de régénération (graines et souches). La valeur du fonds dépend des revenus qu'il est potentiellement possible d'obtenir à partir de celui-ci (dont ceux provenant de la production de bois) et donc du potentiel de production. Il est immeuble par nature. A prix constant (hors inflation), sa valeur est constante. La valeur d'un fonds dépend d'une série de critères : la situation géographique, l'étendue et la forme de la parcelle (effet de lisière), l'accessibilité (aux engins, grumiers), la topographie, l'exposition, le type de sol et ses caractéristiques (profondeur, texture, richesse chimique, économie en eau), l'état du site (présence de souches, de rémanents, d'ornières), les droits et servitudes (servitude de passage, lignes électriques, conduites de gaz), des contraintes législatives (ex. Natura 2000), de concessions non liées à la présence d'arbres (zones de tirs, lignes électrique ...), de potentialités cynégétiques, de la proximité d'industries du bois ainsi que de valeurs additionnelles. D'une façon générale, tout ce

---

7. Convenience value

8. (land) rent

qui permet d'augmenter les recettes et de diminuer les dépenses participe à l'augmentation de la valeur du fonds et inversement (cf. Equation 2.8).

Etant donné que des terrains nus (ex. après mise à blanc) sont parfois vendus, il est possible d'analyser ces ventes et d'obtenir, pour certaines conditions, des estimations de la valeur du fonds d'une forêt. Il n'existe cependant pas de mercuriales tant les caractéristiques à prendre en compte sont nombreuses. En Wallonie, la valeur du fonds de pessières était estimée approximativement à 2500 €/ha avant la modification du code forestier. Depuis la modification du code forestier, les frais de succession sont réduits (et limités uniquement à la valeur du fonds) et les fonds s'échangent maintenant à des prix plus élevés (4000-10000 €/ha).

**Valeur additionnelle** La valeur du fonds peut, en outre, dépendre de valeurs additionnelles, par exemple liées à des infrastructures immobilières présentes sur la parcelle. Il peut d'agir de chalets, d'infrastructures routières, de pistes de débardage, d'un étang, d'installations cynégétiques...

**Valeur de la superficie** La superficie est la valeur des actifs marchands et notamment des bois sur pied. La valeur des bois sur pied est considérée comme immeuble jusqu'à l'abattage des arbres, qui une fois au sol, deviennent meubles. La superficie est la somme de la valeur marchande et de la perte d'avenir (voir ci-dessous).

**Valeur marchande** La valeur marchande<sup>9</sup> d'une forêt est égale au prix obtenu lors de la vente de tous les actifs dans de bonnes conditions commerciales. Pour l'actif des bois sur pied, il s'agit du prix qui serait obtenu si le peuplement était entièrement récolté à un instant donné. La valeur marchande d'un peuplement est normalement inférieure à la valeur vénale d'une forêt car cette dernière intègre également la valeur du terrain (le fonds) et la perte d'avenir des arbres sur pied.

**Valeur de consommation** La valeur de consommation est la valeur marchande diminuée par les frais de commercialisation et d'exploitation. Comme la valeur marchande, il s'agit d'une valeur mo-

---

9. Stumpage value

bilière. Les notions de valeur de consommation et de valeur marchande sont parfois confondues.

**Perte d'avenir** L'ensemble des arbres ne sont récoltés que dans des conditions bien particulières. Généralement, et surtout pour les jeunes peuplements, il est plus intéressant de laisser pousser les arbres, ou au moins une sélection d'arbres, que de les récolter tous. La perte d'avenir est ce que perd le propriétaire s'il renonce aux gains futurs (ex. avec une coupe anticipée). C'est la perte<sup>10</sup> qui serait perçue par un propriétaire s'il coupait immédiatement tous les arbres par rapport à une situation de référence qui consiste à laisser pousser les arbres jusqu'à leur terme optimum d'exploitabilité. La perte d'avenir est positive si le peuplement n'a pas encore atteint la maturité et négative si le peuplement a dépasser la maturité. La perte d'avenir est parfois aussi appelée la valeur d'avenir.

**Valeur de sauvetage** La valeur de sauvetage<sup>11</sup> est la valeur des bois sur pied lorsqu'il sont vendus dans des conditions physiques et commerciales non optimales (qualité amoindrie, vente précipitée, mise en concurrence réduite).

Lors de l'évaluation économique d'une forêt, seuls certains éléments sont pris en compte et, bien souvent, seuls des éléments objectifs facilement quantifiables font l'objet d'une analyse plus poussée. Ainsi, il est fréquent d'utiliser une définition réductrice de la valeur d'une forêt qui ne considère que certains flux financiers et qu'une partie des actifs. Des hypothèses très importantes sont donc posées pour calculer une estimation de la valeur de la forêt. Il est très important de toujours se rappeler ces hypothèses. Ainsi, bien que la production de bois soit souvent mise en avant dans ce cours, les autres services écosystémiques ne doivent pas être oubliés.

### **Illustration : la forêt de la Butte**

Soit une propriété de 50 ha divisée en deux massifs et composée de 5 parcelles (Figure 2.4).

---

10. Opportunity cost

11. Salvage value

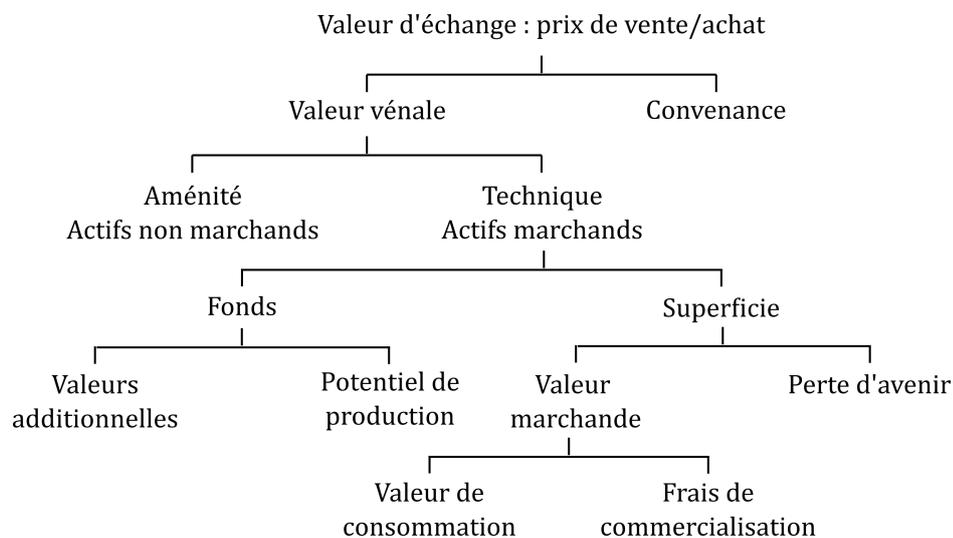


FIGURE 2.3 – Les composantes de la valeur d'échange d'une forêt.

- Parcelle 1 : futaie régulière de hêtre de 50 ans, régénération artificielle, âge d'exploitation fixée à 120 ans ;
- Parcelle 2 : futaie régulière de hêtre de 70 ans, régénération naturelle, âge d'exploitation fixée à 120 ans ;
- Parcelle 3 : futaie irrégulière de hêtre ;
- Parcelle 4 : futaie régulière d'épicéa de 35 ans, nombreux dégâts de gibier.
- Parcelle 5 : taillis-sous-futaie de chêne et charme, rotation 30 ans.

Une expropriation concerne la parcelle 5 et une partie de la parcelle 4 pour la construction d'un barrage. Une ligne électrique sera construite dans la parcelle 1. Un incendie a détruit 2 ha de la parcelle 2. Face à ce constat le propriétaire souhaite :

- vendre le reste de la parcelle 4 ;
- affiner la gestion dans les autres peuplements ;
- estimer la valeur patrimoniale de la propriété.

L'expert forestier mandaté par le propriétaire doit donc estimer :

- Le prix à payer pour l'expropriation. Il s'agira de la valeur vénale additionné éventuellement d'indemnités pouvant tenir compte de la valeur de convenance ;
- Le prix de vente de la partie de la parcelle 4. C'est la valeur vénale.

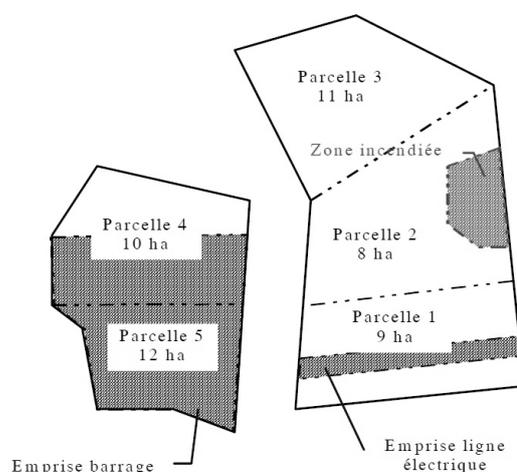


FIGURE 2.4 – Plan de la propriété.

- Le montant de la concession pour la ligne électrique. C'est la valeur de la perte d'avenir additionnée d'une éventuelle réduction de la valeur du fonds. Les arbres seront coupés et donc le propriétaire récupérera la valeur marchande. Cependant, il devra renoncer aux revenus futurs que le peuplement aurait pu apporter. En outre, il ne pourra plus produire des arbres de grandes dimensions. Les potentialités de production seront donc réduites menant à une réduction de la valeur du fonds ;
- Le montant des dommages causés par l'incendie. C'est la valeur de la superficie de la zone incendiée ;
- La valeur de la propriété restante. C'est la valeur vénale.

## 2.2 Les acteurs

A la hauteur de la diversité des biens et services délivrés par les forêts, les acteurs de l'économie forestière sont très diversifiés. On peut notamment citer les acteurs de la filière bois :

- Propriétaires,
- Gestionnaires et experts forestiers,
- Pépiniéristes,
- Entreprises de travaux forestiers,
- Acheteurs de bois,
- Exploitants forestiers,

- Entreprises de transformation (première transformation).

Mais il convient également d'ajouter l'ensemble des bénéficiaires des divers services écosystémiques. Cet ensemble est bien plus vaste puisqu'il peut être étendu aux collectivités à l'échelle globale, régionale et locale. A l'échelle locale, on peut, entre autres, citer les acteurs suivants :

- Chasseurs,
- Associations de conservation de la nature,
- Usagers de la forêt à des fins récréatives.

## 2.3 Les revenus

### 2.3.1 Sources de revenus

Les revenus identifiés dans cette section sont uniquement ceux perçus par un propriétaire bien que les forêts ne bénéficient pas uniquement aux propriétaires. Le propriétaire (ou ayant droit) d'une forêt peut percevoir des revenus de différentes natures.

**Les revenus perçus directement** Certains revenus sont perçus directement. Ces biens, par exemple du bois énergie, de la nourriture ou des plantes médicinales, ne sont pas échangés mais directement consommés.

**Concessions forestières** Un propriétaire de grandes surfaces forestières (ex. un état) peut vendre le droit d'exploiter une surface forestière pendant une période de temps en fixant certaines contraintes. S'il y a plusieurs acheteurs en concurrence, le prix obtenu peut être raisonnable. Dans le cas de corruption et de conspiration, le prix peut, par contre être, sous-évalué. L'utilisation de ce système est intéressant pour le propriétaire si la ressource est peu connue (composition, structure...), s'il y a peu de personnel qualifié pour superviser l'exploitation, si les produits ont peu de valeur (résidus de coupe, bois de chauffage, après une calamité...) et/ou si les produits de grandes valeurs sont dispersés dans la forêt (ex. bois de déroulage/tranchage en forêt tropicale). Dans certains cas, les revenus peuvent être augmentés avec un système de redevance par arbre exploité (prix par espèce et classe de grosseur).

**Vente de bois sur pied** Un propriétaire peut marquer les arbres à vendre (lors du martelage) et les vendre sur pied. Le vendeur doit être capable de recenser les arbres à exploiter par essence (ou catégorie d'essence), par catégories de grosseur, par catégories de qualité, etc. Il doit également être capable d'assurer l'accès aux acheteurs vers les arbres marqués. Le vendeur peut, en outre, spécifier des contraintes (dans un cahier des charges) qu'il souhaite imposer aux acheteurs (ex. dates d'exploitation, utilisation de cloisonnements). Dans certains cas, le vendeur peut imposer l'entrepreneur responsable de l'exploitation ou réaliser l'exploitation en régie, c'est-à-dire avec ses propres ressources, matériel et employés. Dans certains cas, des ventes aux enchères ou par soumission sont organisées pour mettre en concurrence les acheteurs potentiels. Le prix est souvent défini par unité de volume ou de masse. Le prix obtenu correspond à la valeur marchande des bois vendus.

**Vente de bois abattu, vente de "bois à route"** Dans certains cas, l'exploitation et le débardage sont pris en charge par le propriétaire, le gestionnaire, un groupement de propriétaires et de gestionnaires ou une institution tierce. Une première transformation élémentaire est réalisée (écorçage, découpe des grumes) et les arbres sont ensuite rassemblés, souvent par catégories, en bord de route ou sur des parcs à grumes. Dans certains cas, les grumes sont vendues individuellement (Figure 2.5). Ce système de vente nécessite plus de compétences.

**Loyer de chasse** Le droit de chasse est lié à la propriété foncière mais il est transférable à autrui par location ou cession. Le propriétaire peut donc louer le droit de chasse.

En Belgique, cette pratique est encouragée car la chasse ne peut s'exercer que sur des territoires d'une superficie d'un seul tenant supérieure ou égale à 25 ha dans le nord de la Région wallonne, 50 ha dans le sud de la Région wallonne et 40 ha en Région flamande.

En 2021, dans les forêts publiques, la valeur moyenne du loyer indexé était de 37 €/ha pour les forêts domaniales. La valeur minimale était de 0,06 €/ha et la valeur maximale est de 121,53 €/ha. Ces extrêmes représentent toutefois des situations particulières. Le montant du loyer dépend notamment de l'abondance de certaines espèces de gibier.



FIGURE 2.5 – Grumes vendues sur le parc à grumes en Wallonie en 2019. Les photos sur la première ligne correspondent à : 1. Chêne vendu à 17 672 € (2295 €/m<sup>3</sup>) ; 2. Chêne avec une lunure vendu à 180 €/m<sup>3</sup> ; 3. Chêne acheté par un mérandier (Guiller and Prévot, 2019).

**Subsides, primes et avantages fiscaux** Dans certains cas, les pouvoirs publics peuvent apporter un soutien financier. Ils peuvent avoir pour objectif de dédommager les propriétaires après une calamité, d'indemniser les propriétaires lorsque des contraintes leur sont imposées ou de promouvoir certains itinéraires de gestion.

Par exemple, le réseau européen Natura 2000 est un outil de politique européenne. Au travers de l'Europe, des sites ont été sélectionnés pour protéger un certain nombre d'habitats et d'espèces représentatifs de la biodiversité européenne. La liste précise de ces habitats et espèces est annexée à la directive européenne oiseaux et à la directive européenne habitats-faune-flore. Dans les sites du réseau Natura 2000, la gestion est contrainte mais en contrepartie des indemnités peuvent être perçues (40 €/ha/an). Ces parcelles peuvent également être exonérées du précompte immobilier et des droits de successions et de donation.

En Wallonie, suite aux importantes coupes à blancs réalisées dans les pessières suite à des dégâts de scolytes entre 2018 et 2020, la ministre de l'environnement a mis en place un système de primes (appelé Forêt résiliente) afin d'encourager les propriétaires forestiers à reconstituer une forêt plus diversifiée et résiliente (afin qu'elle puisse assurer longtemps les nombreux services écosystémiques). Des primes allant de 1500 à 3000 €/ha ont été perçues en fonction des itinéraires de renouvellement choisis (et notamment du nombre d'espèces en mélange).

### 2.3.2 Prix des bois

Le prix des bois est généralement exprimé par unité de volume. Il dépend de l'essence, de la qualité, de la dimension des grumes et des conditions de vente.

Idéalement, chaque grume est allouée à l'usage proposant le prix le plus élevé. De manière générale, plus une grume a une section importante, plus elle peut avoir de débouchés (demande élevée) et plus le coût de transformation est faible justifiant. Le coût de transformation d'une unité de volume (ex. 1 m<sup>3</sup>) de bois diminue avec la circonférence de la grume. Les grumes de grandes dimensions sont aussi plus rares et l'offre de ce produit est donc plus faible. Ces éléments justifient une augmentation du prix unitaire (€/m<sup>3</sup>) avec la circonférence de la grume.

Par conséquent, il existe généralement une taille minimum qui

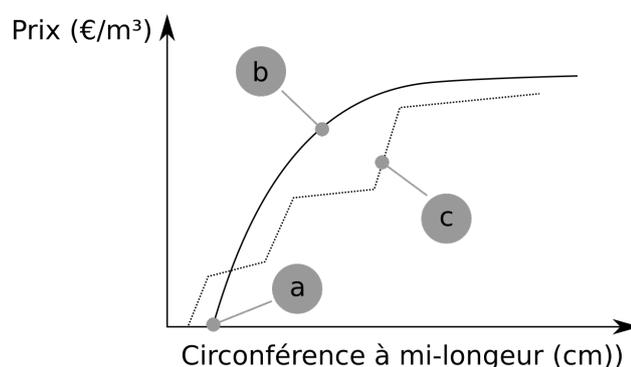


FIGURE 2.6 – Evolution du prix d'une grume en fonction de sa taille et des usages. Généralement, les arbres doivent avoir une taille minimum pour être vendable (prix > 0, a), le prix unitaire augmente ensuite avec la taille de l'arbre et peut saturer à partir d'une certaine dimension (b). En théorie, la relation peut être discontinue si des marchés différents utilisent des seuils de dimensions différents (c).

peut être récoltée sans perte (Figure 2.6-a). Cette taille minimum dépend notamment de la demande locale de certains produits (ex. industrie de trituration à proximité). A partir de cette taille minimum, le prix unitaire augmente en fonction du diamètre de la grume. Cette relation est cependant non linéaire et peut saturer à partir d'un certain point : l'effet des économies réalisées en augmentant la taille des grumes produites s'amenuise (Figure 2.6-b) et l'augmentation de la taille ne permet pas de continuellement accéder à d'autres marchés. La relation n'est pas toujours continue, surtout si des marchés différents utilisent des seuils de dimensions différents (Figure 2.6-c). Cependant, dans la pratique, les arbres ne sont pas vendus individuellement mais par lots et une telle relation discontinue n'est alors pas observée.

Le prix unitaire dépend de l'usage potentiel. Pour certaines essences, l'usage potentiel (injustement appelé parfois qualité) est souvent défini avec une variable catégorielle. Par exemple, en Wallonie, les bois d'essences feuillues sont parfois classés dans quatre catégories ; par exemple, pour le chêne, Jourez et al. (2010) distinguent les catégories suivantes :

- A** Bois de qualité exceptionnelle destinés à être valorisés dans des unités de tranchage, aux ébénisteries et à la production de merrains ;

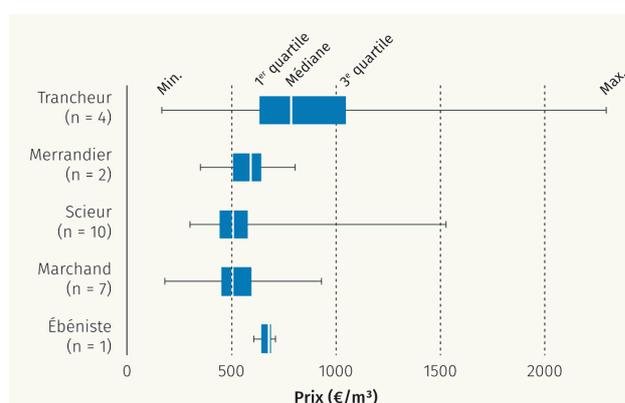


FIGURE 2.7 – Variabilité des prix de vente par catégories de métier des soumissionnaires pour des grumes de chêne vendues sur le parc à grumes de Wallonie en 2019 (Guiller and Prévot, 2019).

- B** Bois de première et deuxième qualité destinés à l'ébénisterie et aux merrains ;
- C** Bois de moindre qualité destinés à produire des lots dépareillés "rustiques", avivés, charpentes, chassis... ;
- D** Bois de qualité dite industrielle destinés à produire des traverses, palettes et bois de chauffage.

Pour les résineux, la qualité revêt moins d'importance. Néanmoins, des décotes sur les prix sont appliquées aux arbres de bordure étant donné leur branchaison et leur important défilement ainsi qu'aux arbres contenant de la pourriture et/ou de la mitraille ou ayant subi des dégâts de gibier. Inversement, une bonne rectitude, un défilement faible et un élagage bien conduit augmentent la valeur des bois puisque ces qualités améliorent le rendement du sciage et le classement des produits sciés.

En analysant les ventes dans une région, il est possible d'obtenir des estimations de prix. Néanmoins, ces données sont généralement lacunaires. Le prix de chaque grume est rarement connu, sauf sur les parcs à grumes (Figure 2.7). Les arbres sont en effet généralement vendus par lots et ces lots sont rarement homogènes. En toute rigueur, il convient dès lors de rassembler un grand nombre d'estimations de prix de lots et d'utiliser ensuite des procédures statistiques adaptées pour estimer le prix des arbres par essence, catégorie de taille et de qualité (Sanchez et al., 2004).

Des telles estimations sont parfois communiquées par des grou-

FEDERATION NATIONALE DES EXPERTS FORESTIERS A.S.B.L. Avenue Gouverneur Bovesse, 112/18, 5100 JAMBES, Tél. 081/31.31.58

PRIX MOYENS DES BOIS SUR PIED (Prix m<sup>3</sup> en Euros)

automne 2022

FEUILLUS							
Circonf. À 1,5m.	100-119	120-149	150-179	180-199	200-219	220-249	250 et +
Chênes de qualité	80 € / 120 € →	120 € / 180 € →	180 € / 250 € ↓	220 € / 300 € ↓	300 € / 350 € ↓	300 € / 350 € ↓	300 € / 400 € ↓
Chênes industriels	50 € / 80 € →	80 € / 140 € →	130 € / 180 € ↓	150 € / 220 € ↓	200 € / 250 € ↓	200 € / 250 € ↓	200 € / 250 € ↓
Chênes d'Amérique	45 € / 80 € →	80 € / 120 € →	120 € / 180 € →	140 € / 200 € →	140 € / 200 € →	140 € / 200 € →	140 € / 200 € →
Hêtres blancs	30 € / 35 € ↗	40 € / 50 € →	60 € / 80 € →	70 € / 100 € ↗	90 € / 110 € ↗	90 € / 120 € ↗	90 € / 120 € ↗
Hêtres rouges et industriels	30 € / 35 € ↗	30 € / 40 € ↗	35 € / 45 € ↗	40 € / 60 € ↗	40 € / 60 € ↗	40 € / 60 € ↗	40 € / 60 € ↗
Frênes de qualité	30 € / 40 € →	50 € / 70 € →	70 € / 90 € →	80 € / 110 € ↗	80 € / 120 € ↗	80 € / 120 € ↗	80 € / 120 € ↗
Frênes industriels	30 € / 40 € ↗	35 € / 45 € ↗	45 € / 55 € ↗	45 € / 55 € →	45 € / 55 € →	45 € / 55 € →	45 € / 55 € →
Peupliers élagués	20 € / 25 € →	30 € / 40 € →	40 € / 50 € →	40 € / 55 € ↗	40 € / 55 € ↗	40 € / 55 € ↗	40 € / 55 € ↗
Peupliers non élagués	20 € / 25 € →	25 € / 30 € →	30 € / 35 € →	30 € / 35 € →	30 € / 35 € →	30 € / 35 € →	30 € / 35 € →
Erables	30 € / 40 € ↗	30 € / 40 € ↗	40 € / 60 € →	60 € / 80 € →	60 € / 80 € →	60 € / 80 € →	60 € / 80 € →
Merisiers	30 € / 40 € ↗	30 € / 40 € ↗	30 € / 40 € →	30 € / 40 € →	30 € / 40 € →	30 € / 40 € →	30 € / 40 € →

Bois de chauffage : 10 à 30 euros/m<sup>3</sup> apparent - stère (Région Wallonne) ↗ 10 à 25 euros/m<sup>3</sup> apparent - stère (Région Flamande) ↗  
 Balisvieux (70 - 100 cm de circonférence) : 25 à 40 euros/m<sup>3</sup> ↗  
 Trituration (feuillus) : 6 à 11 €/tonne ↗ Trituration (résineux) : 5 à 15 €/tonne ↗

EPICEAS							
Circonf. À 1,5m.	20-39	40-59	60-69	70-89	90-119	120-149	150-179
Épicéas sains, toutes régions	5 € / 10 € ↗	15 € / 30 € ↗	30 € / 50 € →	50 € / 60 € ↓	55 € / 70 € ↓	65 € / 80 € ↓	70 € / 80 € ↓
Épicéas scolytés frais	5 € / 10 € ↗	5 € / 15 € ↗	10 € / 25 € ↗	15 € / 30 € ↗	25 € / 45 € →	25 € / 50 € →	25 € / 50 € →

FIGURE 2.8 – Exemple d'une mercuriale de prix publiée par les experts forestiers en Wallonie, en automne 2022. Des fourchettes de prix sont données par m<sup>3</sup> par essence, qualité et classe de circonférence.

pements de gestionnaires et d'experts forestiers (Figure 2.8). Il s'agit de mercuriales de prix.

Pour obtenir la valeur d'un arbre, il convient donc de multiplier le prix unitaire et le volume des produits vendus. La définition utilisée pour caractériser le volume est déterminante pour ce calcul. Dans certains cas, il s'agit de la bille de pied (avec parfois aussi la surbille). C'est le cas dans les parcs à grumes mais aussi lorsque les houppiers ne sont pas récoltés (ex. forêt tropicale). Dans d'autres cas, par exemple en Wallonie, il s'agit du volume bois fort (aussi appelé volume commercial, VC22) correspondant au tronc et aux branches dont la circonférence est supérieure à 22 cm. Pour le bois de chauffage ou de trituration, les unités utilisées sont parfois différentes (stère, tonne).

## 2.4 Les coûts

**Coûts directs** Les coûts directs sont les coûts liés à des opérations physiques (ex. interventions sylvicoles). Ils sont notamment importants pour les travaux de boisement. Il s'agit de travaux de

plantation, de dégagement, d'élagage, etc... La pose de protections contre les ongulés, et en particulier la pose de clôtures (ex. 15 €/par mètre courant), sont également des dépenses importantes. Comme pour le prix des bois, des mercuriales des prix des travaux forestiers sont parfois publiées par différents organismes (Figure 2.9).

La sylviculture de peuplement régulier régénéré par coupe rase et plantation demande de réaliser des investissements conséquents pendant une courte période de temps. La sylviculture de peuplement irrégulier renouvelé de manière continue requiert, par contre, des investissements plus limités mais répétés plus régulièrement (travaux d'entretien de la régénération, monitoring, martelage, ...). La plupart des mercuriales ne permettent pas d'estimer facilement les coûts (très variables d'une situation à une autre). L'Association de la Futaie Irrégulière (AFI, 2020) a observé que ces coûts étaient généralement compris entre 20 et 40 €/ha/an. Très rarement, ils sont supérieurs à 50 €/ha/an. Il convient en outre de tenir compte que les coûts d'exploitation peuvent être supérieurs dans les peuplements irréguliers.

**Coûts indirects** Les coûts indirects comprennent les charges salariales, les assurances, les taxes ainsi que les charges administratives et de fonctionnement. Par simplicité, ils sont parfois exprimés en tant que pourcentages des coûts directs.

**Coûts d'opportunité** Le coût d'opportunité<sup>12</sup> est également appelé coût d'option, coût alternatif, coût de substitution, coût de renonciation ou encore coût de renoncement. Ils désignent la perte des biens auxquels on renonce lorsqu'on procède à un choix, autrement dit, lorsqu'on affecte les ressources disponibles à un usage donné au détriment d'autres choix. Ce coût n'est pas inscrit dans un bilan comptable mais sa prise en compte est utile pour expliquer les choix de gestionnaires.

Imaginons, par exemple, une plantation de chêne d'un hectare sur un terrain qui aurait pu être boisé avec une plantation d'épicéa. La plantation de chêne rapporterait 1000 € de revenu net en moins que la plantation d'épicéa. Dans ce cas, le coût d'opportunité (de planter du chêne plutôt que de l'épicéa) est de 1000 €.

---

12. Opportunity cost

**UETFW**  
Union des Entrepreneurs  
de Travaux Forestiers  
de Wallonie

**UNION  
DES ENTREPRENEURS  
DE TRAVAUX FORESTIERS  
DE WALLONIE**

UNION PROFESSIONNELLE RECONNUE  
Membre de la Confédération Belge du Bois

**2022**  
MERCURIALE DES TRAVAUX

**PRIX D'ORIENTATION DES PRINCIPAUX TRAVAUX SYLVICOLES**  
Prix sur facture H.T.V.A. ; hors fourniture produits et/ou matériaux.  
Les prix varient selon l'accessibilité, le relief, l'état du terrain, la nature, la dimension et l'écartement des essences.

**PRIX HORAIRE DE LA MAIN-D'ŒUVRE SANS MACHINE ET HORS DÉPLACEMENT** ..... 34,30 à 45,40 €

**01 PRÉPARATION DE TERRAINS**

Broyage des branches	..... 975 à 1.600 €/ha
Andainage	..... 660 à 991 €/ha
Fraisage ligne plantation	..... 779 à 1.184 €/ha

**02 PLANTATION**

Résineux :

A la houe-hache	..... 0,44 à 0,64 €/plant
A la tarière et à la bêche	..... 1,11 à 1,40 €/plant

Feuillus :

A la houe-hache	..... 0,46 à 1,01 €/plant
A la tarière et à la bêche	..... 1,11 à 1,40 €/plant
Peupliers	..... 4,46 à 6,86 €/plançon

**03 DÉGAGEMENT ET NETTOIEMENT** ..... 2 à 5 jours/ha  
(cf. prix horaire main-d'œuvre, 8h/jour)

**04 DÉPRESSAGE** ..... sur devis

**05 TAILLE DE FORMATION**

Feuillus	..... en régie
Peupliers	..... en régie

**06 ÉLAGAGE**

Résineux :

Élagage de pénétration (cf. prix horaire main-d'œuvre, 8h/jour)	..... 5 à 8 jours/ha
Élagage de 2 à 6 m	..... 3,81 à 5,86 €/pièce
Élagage de 6 à 8 m	..... 5,55 à 8,07 €/pièce
Feuillus : Élagage de 2 à 6 m	..... 3,17 à 6,66 €/pièce
Peupliers : Élagage de 2 à 8 m	..... 3,17 à 8,72 €/pièce
Emondage	..... en régie

**07 ÉPANDAGE D'ENGRAIS** ..... 92,00 €/t (1 à 2 t/ha)

**08 PROTECTION**

Application de répulsifs : Abroustissement	..... à partir de 0,11 €/plant
Frottis	..... à partir de 0,15 €/plant
Pose de gaines	..... à partir de 1,36 €/pièce
Pulvérisation contre l'hylobe (produit compris)	..... à partir de 0,15 €/plant
Rabotage	..... à partir de 1,34 €/plant
Application laine de mouton (laine comprise)	..... à partir de 0,13 €/plant

**09 POSE DE CLÔTURES** ..... sur devis

**10 GESTION** ..... sur devis  
(Inventaire, Martelage,...)

**11 ENTRETIEN DE RÉSERVES NATURELLES** ..... sur devis  
(Pose caillebotis, Fauchage,...)

**12 AUTRES** ..... sur devis  
(Entretien Espaces Verts, Abattage arbres dangereux,...)

FIGURE 2.9 – Exemple de mercuriale pour les travaux forestiers publiée en par l'union des entrepreneurs de travaux forestiers de Wallonie.

**Coût fictif** Le coût fictif correspond à la perte de bénéfices sociaux nets auxquels un agent économique renonce pour effectuer une activité donnée. Il fait référence à des biens et services non marchands. Le calcul de ce coût peut alors reposer sur l'estimation du consentement à payer. Comme le coût d'opportunité, ce coût ne sera pas inscrit dans le bilan comptable.

Par exemple, le coût fictif d'un employé pour une entreprise considérera la valeur du salaire pour l'employeur, la valeur que l'employé a du travail, la valeur de ce que l'employé aurait pu produire d'autre, le niveau de satisfaction de l'employé dans sa nouvelle position par rapport à une ancienne position...

**Externalités** Les externalités caractérisent le fait qu'un agent économique crée, par son activité, un effet externe en procurant à autrui, sans contrepartie monétaire, une utilité ou un avantage gratuit, ou au contraire une nuisance, un dommage sans compensation. Ce coût n'est pas non plus inscrit dans le bilan comptable.

## 2.5 Echancier

Un investissement forestier se caractérise donc par un ensemble de recettes et de dépenses qui peuvent être perçues à différents moments. Nous présenterons souvent cette information sous forme d'un échancier. Il s'agit d'un tableau indiquant le montant et l'année des différentes recettes et dépenses (Tableau 2.1). Les coûts d'opportunité, coûts fictifs et coûts des externalités ne seront pas inscrits dans les échanciers.

La durée de l'échancier dépendra des objectifs de l'évaluation économique, des indicateurs souhaités et du traitement sylvicole (ex. futaie équienne ou inéquienne). Ces éléments seront abordés dans le chapitre suivant.

L'échancier rassemble, en réalité, un grand nombre d'hypothèses dont dépendront beaucoup de calculs (ex. estimation de la valeur d'une forêt). Ces hypothèses concernent notamment l'itinéraire sylvicole, le montant des interventions et des recettes, les dates auxquelles les flux financiers sont perçus, la nature des recettes et des dépenses considérées...

Les flux financiers inscrits dans un échancier sont exprimés en prix constants. Les prix constants sont les prix corrigés de l'inflation (Section 5.3.1). Les prix constants peuvent être comparés dans

le temps sans tenir compte de l'inflation ce qui n'est pas le cas des prix courants. Les prix courants sont les prix tels qu'ils sont indiqués à une période donnée (ou prix en valeur nominale). Parfois certains flux financiers sont évalués avec des données provenant de périodes différentes. Il s'agit par exemple de données financières historiques (interventions ou ventes réalisées dans le passé) ou de données provenant de documents publiés à différentes périodes (ex. mercuriale de 2010 et de 2020). Les prix courants obtenus doivent alors être convertis en prix constants en divisant leur valeur par l'indice des prix à la consommation (Equation 2.1) correspondant (en termes notamment de région et d'année de référence).

$$\text{Prix constant} = \frac{\text{Prix courant}}{\text{Indice des prix}} \quad (2.1)$$

TABLE 2.1 – Exemple d'un échéancier pour un scénario de gestion d'une pessière régénérée par mise à blanc et plantation. La colonne flux correspond à la différence entre les recettes et les dépenses. Les montants sont donnés en €/ha. Cet échéancier sera utilisé pour illustrer plusieurs concepts tout au long de ce cours.

An	Opération sylvicole	Dépense	Recette	Flux net
0	Préparation du sol/plantation	2800,00		-2800,00
1	Dégagement	450,00		-450,00
2	Dégagement	450,00		-450,00
17	Elagage	1900,00		-1900,00
22	Eclaircie		371,51	371,51
28	Eclaircie		326,68	326,68
34	Eclaircie		835,21	835,21
40	Eclaircie		1383,42	1383,42
46	Eclaircie		2068,79	2068,79
52	Eclaircie		2305,14	2305,14
58	Coupe finale		25472,32	25472,32

## 2.6 Le traitement du temps

### 2.6.1 La valeur du temps

Pour la majorité des personnes, un euro aujourd'hui ou un euro dans 10 ans n'a pas la même valeur. D'après un sondage auprès d'étudiants (en 2022,  $n=38$ ), la majorité des étudiants (92%) préfèrent recevoir 1000 € aujourd'hui plutôt que dans un an. Recevoir un euro aujourd'hui permet d'investir cet euro dès aujourd'hui. Le fruit de cet investissement peut alors permettre de posséder plus d'un euro plus tard. Reporter une recette à plus tard a donc un coût (coût d'opportunité).

66 % des étudiants ont indiqué qu'ils préfèrent recevoir 1050 € dans un an plutôt que 1000 € aujourd'hui. Autrement dit, ils concèdent à renoncer à recevoir 1000 € aujourd'hui s'ils peuvent recevoir 1050 € dans un an. En toute logique, le rendement de l'investissement proposé ( $j = 1050/1000 - 1 = 5\%$ ) est trop faible pour attirer ceux (34 %) qui ont décidé de ne pas investir. Pour ces personnes, renoncer à une consommation immédiate a un coût d'opportunité supérieur à 50 € perçus dans un an.

Il était ensuite demandé aux étudiants quel était le montant minimum qu'ils souhaitent recevoir pour accepter d'investir 1000 € pendant un ou dix ans (Tableau 2.2). On observe que ce montant est très variable entre les étudiants et augmente avec la durée de l'investissement. Il est en moyenne de 1152 € pour un investissement d'un an et de 8528 € pour un investissement de 10 ans. Curieusement, le taux d'intérêt correspondant ne semble pas si différent entre les deux investissements (Tableau 2.2) bien qu'il soit légèrement plus faible pour l'investissement avec l'échéance la plus longue.

Cet exemple montre que pour la grande majorité des individus, il n'est pas pertinent de comparer des flux financiers sans tenir compte de la date des flux financiers. Les flux financiers immédiats pèsent plus dans leur décision que les flux financiers éloignés dans le temps.

TABLE 2.2 – Statistiques des réponses à un sondage proposé à des étudiants. Il leur était demandé quel était le montant minimum qu'ils souhaitaient recevoir pour accepter d'investir 1000€ pendant un ou dix ans. Le taux d'intérêt ( $j$ ) correspondant a ensuite été calculé.

Statistique	Durée = 1 an		Durée = 10 ans	
	Montant	$j$ (%)	Montant	$j$ (%)
Quantile 25%	1050	5	1725	5.6
Médiane	1100	10	2178	8.1
Moyenne	1152	15.2	8528	24.0
Quantile 75%	1175	17.5	8000	23.1

### 2.6.2 Les intérêts composés

Le principe des intérêts composés<sup>13</sup> est généralement bien connu (dans notre monde capitaliste). Un montant d'argent (capital) est investi et périodiquement des intérêts sont perçus.

Soit un dépôt de 1000 € avec un taux d'intérêt de  $j = 0.1 = 10\%$ .

Après un an, le dépositaire a :

$$1100 \text{ €} = 1000 + 100 = 1000 \cdot (1 + j)$$

Après 2 ans :

$$1210 \text{ €} = 1100 \cdot (1 + j) = 1000 \cdot (1 + j) \cdot (1 + j)$$

Après 10 ans :

$$2593 \text{ €} = 1000 \cdot (1 + j)^{10}$$

De manière générale, le montant d'un placement pour une année  $t$  est calculé avec la formule suivante :

$$M_{(t)} = M_{(0)}(1 + j)^t \quad (2.2)$$

où  $M_{(0)}$  est le montant de l'investissement initial,  $M_{(t)}$  le montant à l'année  $t$  et  $j$  le taux d'intérêt.

Notons que l'effet du temps sur la valeur du capital est exponentiel et que la valeur du taux d'intérêt est évidemment déterminante (Figure 2.10). Il convient également de noter que la même formule est utilisée dans des domaines d'application bien différents : par exemple, pour exprimer un taux de mortalité d'une population ou un taux de réduction des gaz à effet de serre.

13. Compound interests

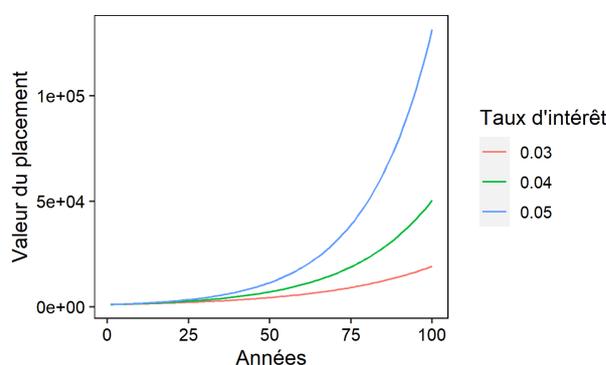


FIGURE 2.10 – Evolution de la valeur d'un placement de 1000€ au cours du temps et pour trois valeurs de taux d'intérêt. On note que l'effet du temps est exponentiel.

### 2.6.3 L'actualisation

Afin de comparer des flux financiers imputés à différentes dates, il convient d'actualiser ces flux financiers, c-a-d., de calculer leur valeur actuelle. L'équation 2.2 est utilisée en remplaçant le taux d'intérêt par un taux d'actualisation ( $r$ ). Les significations du taux d'actualisation et du taux d'intérêt sont néanmoins bien distinctes. Le taux d'actualisation a seulement pour objectif de tenir compte du fait qu'un flux (souvent financier) immédiat pèsent plus dans les décisions des individus qu'un flux plus éloigné dans le temps (Section 2.6.1). Le choix de la valeur du taux d'actualisation est déterminant mais compliqué. Nous y reviendrons plus en détail (Chapitre 2.6.3).

La valeur actualisée ou valeur actuelle (VA ou  $V_{(t=0)}$ ) d'un flux financier  $V_{t=n}$  perçu dans  $n$  années (dans le futur donc) est égale à :

$$VA = V_{(t=0)} = \frac{V_{t=n}}{(1+r)^n} \quad (2.3)$$

De la même manière, la valeur d'un flux financier  $V_{t=-n}$  perçu, dans le passé, il y a  $n$  années sera égale à :

$$VA = V_{(t=0)} = V_{(t=-n)} \cdot (1+r)^n \quad (2.4)$$

Ces deux équations (Equation 2.3 et 2.4) permettent donc de calculer la valeur actuelle de flux financiers futurs et passés. On parlera respectivement de capitalisation et d'escompte du flux financier.

**Formules pour une période continue** Le calcul des intérêts composés ou d'actualisation est parfois réalisé avec l'équation 2.5 :

$$V_{(t=n)} = V_{(t=0)} \cdot e^{\rho \cdot t} \quad (2.5)$$

où  $e$  est la base du logarithme népérien et  $\rho$  le taux d'actualisation ou d'intérêt et  $t$  le nombre d'unités de temps (années, jours, fractions d'année). Cette formulation est équivalente à la précédente (eq. 2.2) mais elle possède certains avantages (solution numérique pour certains systèmes d'équations). Elle permet, en outre, d'exprimer le temps avec une variable continue. Les formules présentées avant n'étaient applicables que si la capitalisation ou l'escompte étaient discontinus. Les intérêts s'accumulaient par années, mois, journées ou heures entières.

On peut montrer que les deux formulations sont équivalentes. Dans le cas, de la capitalisation de la valeur on peut réécrire l'équation 2.4 de la manière suivante :

$$V_{(t)} = V_{(t=0)} \cdot \left(1 + \frac{\rho}{m}\right)^{mt}$$

où  $V_{(t)}$  la valeur au temps  $t$  du flux financier  $V_{(t=0)}$ ,  $\frac{\rho}{m}$  le taux d'intérêt ou le taux d'actualisation,  $mt$  le nombre total de périodes de capitalisation/escompte,  $t$  le terme en nombre d'années et  $m$  le nombre de périodes par an.

Si on considère que les intérêts s'accumulent de manière continue alors  $m \rightarrow \infty$  et sachant que :

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{\rho}{m}\right)^m = e^{\rho}$$

Alors

$$V_{(t)} = V_{(0)} \cdot e^{\rho t}$$

Les deux formules sont bien équivalentes mais  $\rho$  et  $r$  n'ont pas la même valeur :  $\rho = \log_e(1 + r)$ .

#### 2.6.4 Investissement et désinvestissement

La valeur d'un capital forestier évolue également au gré des investissements et désinvestissements. Prenons, par exemple, le cas d'une pessière dans laquelle un élagage est réalisé (Tableau 2.1). On peut supposer que la valeur du peuplement (le prix de vente)

est supérieur après la réalisation de cet élagage. De même, lorsqu'une éclaircie est réalisée, une partie des arbres est récoltée et, par conséquent, la valeur du peuplement diminue.

Au cours d'une année (d'un mois, d'un jour ou d'une heure), la valeur d'une forêt augmente si des investissements sont réalisés (de l'argent est injecté dans la forêt) et diminue si des désinvestissements sont réalisés. La valeur d'une forêt après des investissements/désinvestissements,  $V_{(a*)}$ , dépend de la valeur avant les investissements/désinvestissements,  $V_{(a)}$ , et de leurs montants ( $D_{(a)}$  pour les investissements,  $R_{(a)}$  pour les désinvestissements) :

$$V_{(a*)} = V_{(a)} + D_{(a)} - R_{(a)}$$

Ainsi, la valeur d'une parcelle mise à blanc est égale au fonds ( $V_{(0)} = F$ ). Une fois la plantation réalisée, la valeur de la parcelle est égale à  $V_{(0*)} = F + D_{(0)}$ .

### 2.6.5 La valeur actuelle nette

La méthode d'actualisation permet de calculer la valeur pour une année de référence de flux financiers imputés à différentes années. Ces différents flux après avoir été actualisés (standardisés) peuvent être sommés pour obtenir la valeur actuelle nette<sup>14</sup> (VAN) de l'ensemble des flux financiers considérés. L'ensemble des valeurs (montants et années) présentées dans l'échéancier est ainsi synthétisé dans une seule valeur.

Soient des dépenses et des recettes futures étalées de l'instant 0 à l'année  $n$ , alors la valeur actuelle nette est :

$$\text{VAN}_{0 \rightarrow n}(t = 0) = \sum_{i=0}^n \frac{R_i - D_i}{(1 + r)^i} \quad (2.6)$$

La formule peut également être inversée pour calculer la valeur des flux financiers antérieurs à l'année de référence :

$$\text{VAN}_{0 \rightarrow n}(t = n) = \sum_{i=0}^n (R_i - D_i) \cdot (1 + r)^{n-i}$$

Cette valeur, la VAN, dépend donc des revenus et des dépenses futures ou passées. La VAN est calculée pour une année de référence

---

14. Net present value

( $t = 0$  ou  $t = n$  dans les équations ci-dessus) et pour certains flux s'étalant sur une période donnée (de 0 à  $n$ ).

Les notations mathématiques utilisées pour la VAN dans cette section précisent de manière explicite l'année de référence et la période considérée. Néanmoins, cette notation est assez encombrante et une notation plus simple mais moins explicite sera parfois utilisée par la suite. A défaut de précision, l'année de référence sera l'année 0 et tous les flux seront considérés à partir de l'année 0 jusqu'à l'année  $n$ .

Ainsi les notations suivantes sont équivalentes :

$$VAN_{0 \rightarrow n}(t = 0) = VAN_n = VAN$$

### 2.6.6 Valeur actuelle nette à perpétuité

Un investisseur peut désirer comparer des investissements de durées différentes : par exemple, un scénario sylvicole d'une période avec une révolution de 50 ans avec un scénario pour lequel la révolution est de 60 ans qui permet d'obtenir des arbres de plus grandes sections et de qualité supposée supérieure. Pour comparer ces deux scénarios, il est néanmoins indispensable de les comparer pour une durée commune. En effet, pour le premier scénario, si l'on ne comptabilise que les 50 années de la première révolution, on néglige alors les flux financiers qui seront perçus entre les années 50 et 60 ainsi que la valeur du jeune peuplement qui se sera installé de 50 à 60 ans.

Afin de pouvoir comparer des scénarios sylvicoles de durées différentes, il est fréquent de calculer la VAN pour un horizon de temps infini en supposant une succession infinie de révolution de même durée, c'est-à-dire la valeur actuelle nette à perpétuité ( $VAN_{0 \rightarrow \infty}$ ).

#### Annuité

Une annuité correspond à une somme d'argent versée ou reçue annuellement. Dans certains cas, l'annuité peut être considérée comme perpétuelle. Il sera alors considéré qu'un même montant est perçu annuellement et à perpétuité. Si le taux d'actualisation n'est pas nul, alors il est possible d'estimer la valeur actuelle de cette annuité.

Prenons, par exemple, un ticket de lotterie qui permet à son propriétaire d'obtenir 1€ chaque année à perpétuité. La valeur actuelle

de ce ticket est de 50 € si l'on utilise un taux d'actualisation de 2%. Cela veut donc dire qu'il est équivalent pour le propriétaire de recevoir 1 € tous les ans jusqu'à l'infini (on suppose que le ticket peut être transmis de génération en génération) ou de recevoir 50€ aujourd'hui. La valeur actuelle d'une annuité de  $A$  € est calculée avec l'équation 2.7.

$$\text{VAN}_\infty = A/r \quad (2.7)$$

Pour démontrer cette formule, il convient de se souvenir des propriétés d'une série géométrique. La série géométrique de raison  $z$  est la série de terme général  $z^m$  :

$$S_m = a + a.z + a.z^2 + \dots + a.z^m = \begin{cases} a \cdot \frac{1-z^{m+1}}{1-z} & \text{si } z \neq 1 \\ a \cdot (m+1) & \text{si } z = 1 \end{cases}$$

Si  $|z| < 1$ , la série est convergente ; Par contre, si  $|z| \geq 1$ , la série est divergente, son terme général ne tend pas vers zéro.

Pour un ticket de lotterie rapportant annuellement 1 € de l'année 1 jusqu'à l'infini, la valeur actuelle est :

$$\text{VAN}_\infty = \frac{1}{1+r} + \frac{1}{(1+r)^2} + \frac{1}{(1+r)^3} + \dots + \frac{1}{(1+r)^\infty} = \frac{1}{r}$$

En ajoutant 1 des deux côté de l'égalité, on retrouve une série géométrique de raison  $z = \frac{1}{1+r}$  et avec  $a = 1$  :

$$\text{VAN}_\infty + 1 = 1 + \frac{1}{1+r} + \left(\frac{1}{1+r}\right)^1 + \left(\frac{1}{1+r}\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{1+r}\right)^\infty$$

la raison étant  $< 1$  si  $r > 0$ , la suite converge et la somme est égale à :

$$\text{VAN}_\infty + 1 = a \cdot \frac{1 - z^{m+1}}{1 - z} = \frac{1 - \left(\frac{1}{1+r}\right)^{m+1}}{1 - \frac{1}{1+r}}$$

Si  $m \rightarrow \infty$  alors  $\left(\frac{1}{1+r}\right)^{m+1} \rightarrow 0$  et le résultat de la somme devient :

$$\text{VAN}_\infty + 1 = \frac{1}{1 - \frac{1}{1+r}} = \frac{1}{\frac{1+r-1}{1+r}} = \frac{1+r}{r} = \frac{1}{r} + 1$$

$$\text{VAN}_\infty = \frac{1}{r}$$

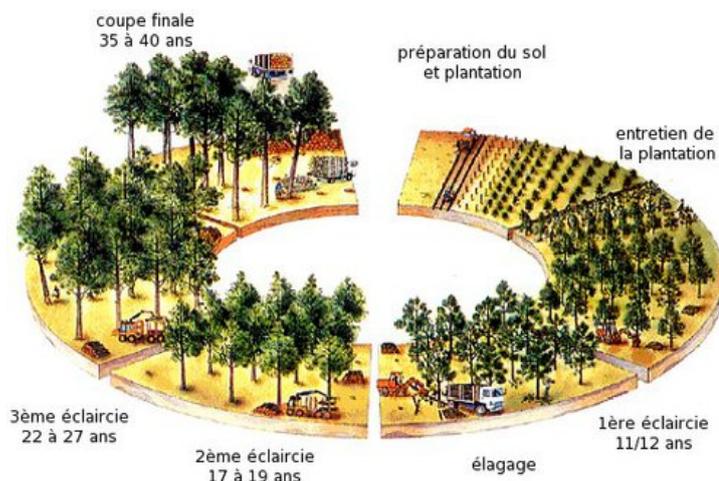


FIGURE 2.11 – Cycle de production d'une futaie régulière.

### Cycle de production

Dans certains cas, il est possible d'identifier un cycle de production. Par exemple, le cycle de production d'une plantation d'épicéa débute un peu avant la plantation et se termine après la mise à blanc (Figure 2.11). Il s'agit bien d'un cycle, puisque l'état initial et final sont les mêmes (on suppose que les prix sont constants en travaillant hors inflation). On peut, en outre, supposer que ce cycle se répète à l'infini. Évidemment, c'est une hypothèse assez peu réaliste. Elle est néanmoins indispensable afin de comparer rigoureusement des scénarios de durées différentes.

Si le cycle de  $n$  années se répète indéfiniment dans le temps alors la  $VAN_{0 \rightarrow \infty}$  peut être calculée avec la formule de Faustmann :

$$VAN_{0 \rightarrow \infty}(t = 0) = VAN_{0 \rightarrow n}(t = 0) \cdot \frac{(1 + r)^n}{(1 + r)^n - 1} \quad (2.8)$$

Afin de démontrer cette formule, considérons un cycle de production composé seulement d'une dépense initiale  $D_{(0)}$  et d'une recette finale après  $n$  année  $R_{(n)}$  (Figure 2.12). Ce cas particulier pourra rapidement être généralisé en considérant des dépenses et recettes intermédiaires.

Si le cycle se répète à l'infini, la VAN à l'année  $a$  est égale à la somme des revenus nets futurs actualisés :

$$V_a = \frac{R_{(n)} - D_{(0)}}{(1 + r)^{n-a}} + \frac{R_{(n)} - D_{(0)}}{(1 + r)^{2n-a}} + \frac{R_{(n)} - D_{(0)}}{(1 + r)^{3n-a}} + \dots$$

On factorise l'équation :

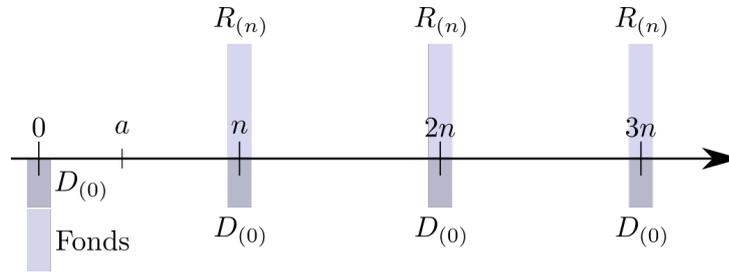


FIGURE 2.12 – Illustration de la répartition des recettes et des dépenses pour un cycle de production composé uniquement de deux flux financiers et qui est répété à l’infini.

$$V_a = \frac{R_{(n)} - D_{(0)}}{(1+r)^{n-a}} \cdot \left(1 + \frac{1}{(1+r)^n} + \frac{1}{(1+r)^{2n}} + \frac{1}{(1+r)^{3n}} + \dots\right)$$

où le terme entre parenthèses correspond à une série géométrique de raison  $z = \frac{1}{(1+r)^n} < 1$  dont le résultat de la somme est  $S_m = a \frac{1-z^{m+1}}{1-z}$

$$V_a = \frac{R_{(n)} - D_{(0)}}{(1+r)^{n-a}} \cdot \frac{1 - \left(\frac{1}{1+r}\right)^{n(m+1)}}{1 - \frac{1}{(1+r)^n}}$$

si  $m \rightarrow \infty$  alors  $\left(\frac{1}{1+r}\right)^{n(m+1)} \rightarrow 0$

$$V_a = \frac{R_{(n)} - D_{(0)}}{(1+r)^{n-a}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{(1+r)^n}}$$

$$V_a = \frac{R_{(n)} - D_{(0)}}{(1+r)^{n-a}} \cdot \frac{1}{\frac{(1+r)^n - 1}{(1+r)^n}} = (R_{(n)} - D_{(0)}) \cdot \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

### Cycle de production après une période de transition

Dans certains cas, le cycle de production est précédé de plusieurs années de transition. Par exemple, le gestionnaire d’une forêt irrégulière pourrait décider de réduire le volume sur pied d’un peuplement pendant  $m$  années pour ensuite obtenir un peuplement qui peut être considéré à l’équilibre et dans lequel les mêmes coupes seront réalisées toutes les  $k$  années.

La VAN du peuplement pour les  $m$  premières années est calculée avec l’équation 2.6 :

$$\text{VAN}_{0 \rightarrow m}(t = 0) = \sum_{i=0}^m \frac{R_i - D_i}{(1+r)^i}$$

La valeur du peuplement à  $m$  années pourra être calculée à partir des flux financiers qui seront perçus pendant les  $k$  années du cycle perpétuel (en utilisant l'équation 2.8).

$$\text{VAN}_{m \rightarrow \infty}(t = m) = \sum_{i=0}^k \frac{R_i - D_i}{(1+r)^i} \cdot \frac{(1+r)^k}{(1+r)^k - 1}$$

La VAN calculée de  $t = 0$  à  $t = \infty$  correspond alors à la somme de la valeur actualisée des flux financiers des  $m$  premières années et de la valeur actualisée du peuplement à  $m$  années.

$$\text{VAN}_{\infty} = \text{VAN}_{0 \rightarrow \infty}(t = 0) = \text{VAN}_{0 \rightarrow m}(t = 0) + \frac{\text{VAN}_{m \rightarrow \infty}(t = m)}{(1+r)^m} \quad (2.9)$$

**Remarque importante :** Puisque l'on suppose que la gestion est cyclique et se répète indéfiniment, cela implique que l'instant initial soit le même que l'instant final. Dans l'équation 2.8, l'instant 0 correspond à l'année  $n$  et dans l'équation 2.9, l'année  $m$  correspond à l'année  $m + k$ . Il est important lors de l'application des formules de ne pas dupliquer des flux financiers. Par convention, on indiquera les investissements (dépenses) au début de la période cyclique et les recettes à la fin de la période cyclique.

En outre dans l'équation 2.9, les flux financiers de l'année  $m$  peuvent être pris en compte soit dans le calcul de la valeur de la phase transitoire ou de la phase cyclique. Il est incohérent d'ajouter la valeur actualisée d'un même flux financier dans les deux périodes. Il convient de bien identifier les flux qui font partie du cycle perpétuel (et qui se répètent de période en période) de ceux qui font partie de la période transitoire.

## 2.7 Les risques, incertitudes et résilience

Contrairement au monde agricole et financier, les forestiers planifient leurs investissements sur des temps très longs (décennies à siècles). A cette échelle, la part d'incontrôlables et d'incertitudes est

substantielle. Face à ce constat, certains pourraient décider d'ignorer ces incertitudes. Ce serait cependant irresponsable et inexcusable. Toutes les prévisions sont imparfaites. Mais de bonnes prévisions permettent d'aiguiller des décisions rationnelles de gestion forestières. Les bonnes prévisions doivent tenir compte des incertitudes (Price, 1989, p112).

### 2.7.1 Sources de risques et d'incertitudes

Parmi les sources de risques et d'incertitudes, on peut lister, à titre illustratif et non-exhaustif, les catégories suivantes :

**Evènements naturels** Il s'agit, par exemple, d'évènements climatiques (sécheresses, inondations, neiges collantes, tempêtes) ou biotiques (attaques d'insectes, de pathogènes, ou par la faune) ;

**Progrès techniques** L'apparition de nouvelles technologies de récolte ou de transformation du bois peut impacter la filière bois et modifier les prix de certaines catégories de bois ;

**Facteur humain** Il s'agit, par exemple, d'incendies criminels ou accidentels ou des coupes illégales ;

**Marché** Le marché des produits bois et de la main d'œuvre est notamment sensible aux expansions et récessions économiques ;

**Politique** La modification de lois et de taxes est également de nature à modifier la rentabilité d'un projet forestier.

### 2.7.2 Définition du risque

Il est généralement admis qu'un risque<sup>15</sup> est la probabilité d'occurrence de d'un évènement dommageable lié à l'exposition d'enjeux vulnérables à un aléa. L'aléa<sup>16</sup> est un évènement plus ou moins prévisible, hors de contrôle. On décrit un aléa par sa nature, sa localisation, sa fréquence (probabilité et/ou date d'occurrence) et son intensité. Les enjeux<sup>17</sup> sont définis par les biens et les personnes exposées aux dommages. La vulnérabilité<sup>18</sup> reflète la fragilité d'un enjeu (des biens, des personnes, des systèmes sociaux) face à un

---

15. Risk

16. Hazard

17. Stakes

18. Vulnerability

aléa. L'aléa ne devient un risque qu'en présence d'enjeux humains, économiques et environnementaux, possédant une certaine vulnérabilité (fragilité).

Les notions de risque et d'incertitude peuvent, en outre, se distinguer en fonction de notre niveau de connaissance. Nous distinguons quatre niveaux de connaissance :

**Ignorance** : on ne sait rien.

**Incertitude** : on peut définir les différents états possibles mais on ne sait pas quelle est la probabilité de chacun de ces états.

**Risque** : contrairement à l'incertitude, la probabilité des différents états peut être estimée. La caractérisation des risques requiert des données actuarielles (description d'évènements passés) et de modèles de prévision suffisamment fiables.

**Certitude** : on connaît précisément l'état futur.

Des situations dominées par l'ignorance ou la certitude sont très rares. La plupart des décisions sont donc prises en présence d'incertitudes ou de risques.

### 2.7.3 Définitions de la résilience

Après une perturbation, le système sera qualifié de résilient s'il est en mesure de se restaurer. La résilience est la capacité d'un système à répondre à une perturbation en résistant et en récupérant rapidement. Cette notion peut paraître simple si on l'applique à une tige métallique que l'on viendrait à déformer. L'alliage sera qualifié de résilient si la tige métallique reprend rapidement sa forme initiale. La transposition de ce concept à un écosystème forme le concept de résilience écologique. Cette notion est plus complexe et il y a d'ailleurs plusieurs définitions.

Pour certains, il s'agit de la capacité d'un écosystème à retrouver les structures et les fonctions de son état de référence après une perturbation. Après une perturbation (par exemple une sécheresse), il y a une perte de biomasse. En fonction de la résistance du peuplement, la perte de biomasse sera plus ou moins importante. Par la suite, le stock de biomasse se reconstruira plus ou moins rapidement en fonction des capacités de récupération de l'écosystème. L'écosystème sera dit d'autant plus résilient que cette récupération est rapide et donc que le niveau initial de biomasse sera retrouvé. Cet exemple est une application réductrice du concept de

résilience. Il ne considère qu'un indicateur de la structure de l'écosystème, la biomasse, et les services écosystémiques ne sont pas quantifiés. Ils sont, de manière un peu simpliste, supposés proportionnels à la biomasse. Avec cette première définition, la résilience dépend des indicateurs utilisés, de l'état de référence et de la perturbation considérés.

Une autre définition est celle de la résilience socio-écologique. C'est la capacité d'un système socio-écologique à soutenir sa capacité à long terme à fournir les multiples services écosystémiques qui soutiennent le bien-être humain en restant dans les limites de la planète face à l'incertitude et aux changements. Cette définition rend plus explicite les liens entre la société et l'environnement ainsi que les limites de ces deux ensembles.

Comme pour la première définition, la résilience dépendra également de l'échelle spatiale et temporelle considérée. Le sylviculteur regarde souvent un peuplement isolément des autres mais c'est souvent la résilience à l'échelle du massif forestier qui est importante pour assurer les différents services écosystémiques.

#### **2.7.4 Indicateurs de performance de projets risqués**

Pour illustrer la complexité de décisions prises en tenant comptes des incertitudes et des risques, supposons que nous projetons de développer un projet de plantation et de construction d'une unité de transformation (Price, 1989). Ce projet pourra être mis en place sur une des trois îles disponibles (St Fitts, St Starts, Ambigua). Les îles diffèrent en termes de sensibilité aux ouragans. La valeur actuelle nette des trois projets a donc été calculée en supposant soit qu'aucun ouragan n'aura lieu pendant la durée du projet, ou en considérant qu'un ouragan aura lieu (Tableau 2.3). A partir de cette analyse de sensibilité, on remarque qu'il n'est pas facile de faire un choix. L'île la plus intéressante n'est pas la même dans un cas ou dans l'autre (avec ou sans ouragan). Des indicateurs ont donc été développés pour justifier différents choix. Ils sont théoriques et ne sont pas très précieux pour guider le choix de gestionnaires. Ils ont toutefois l'avantage d'illustrer la complexité de la décision.

**Critère de Wald** Le critère de Wald privilégie la meilleure stratégie en ne considérant que la pire situation de chaque stratégie (St Fitts).

TABLE 2.3 – Valeur actuelle nette d'un projet d'investissement en fonction de l'île choisie et de l'occurrence d'un ouragan.

Situation	Stratégie		
	St Fitts	St Starts	Ambigua
Avec ouragan	5 €	-2 €	2 €
Sans ouragan	8 €	16 €	10 €

**Maximax** Le critère de Maximax privilégie la meilleure stratégie en ne considérant que la meilleure situation de chaque stratégie (St Start).

TABLE 2.4 – Matrice de regret pour l'application du critère de regret minimax de Savage. "\*" indique le regret maximum de chaque stratégie.

Situation	VAN max.	Stratégie		
		St Fitts	St Starts	Ambigua
Avec ouragan	5	5-5 =0	-2-5=7*	2-5=3
Sans ouragan	16	8-16=-8*	16-16=0	10-16=-6

**Regret minimax de Savage** Le regret minimax de Savage correspond à une stratégie qui viserait à éviter les pires situations. Elle présume que les décideurs évitent les décisions qui pourraient être jugées comme malavisées. Le regret est la différence entre la VAN d'un projet et la VAN maximum qu'il aurait été possible d'obtenir (Tableau 2.4, coût d'opportunité). Le projet sélectionné sera celui qui, quoiqu'il arrive, évite les situations de regret maximum (Ambigua).

**Probabilité égale de Laplace** A défaut de connaître les probabilités de chaque situation, la méthode considère que les situations sont équiprobables. La méthode sélectionne la stratégie menant à la valeur attendue moyenne maximum (St Starts, Tableau 2.5).

Nous observons que l'application de ces quatre critères mène à des résultats différents. En fonction du critère choisi, l'île St Fitts, St Starts ou Ambigua peut être privilégiée. Ces indicateurs ne tiennent compte que d'une partie de l'information disponible. Il n'y a logiquement pas uniquement quatre niveaux de connaissance mais plutôt

TABLE 2.5 – Calcul de la valeur attendue moyenne pour les trois stratégies de gestion.

<b>Situation</b>	<b>Stratégie</b>		
	St Fitts	St Starts	Ambigua
Avec ouragan	$0.5 \times 5 = 2.5$	-1	1
Sans ouragan	$0.5 \times 8 = 4$	8	10
Valeur attendue moyenne	6.5	7	6

TABLE 2.6 – Calcul de la valeur attendue moyenne pour les trois stratégies en considérant que la probabilité d'être impacté par un ouragan est de 60 %.

<b>Situation</b>	<b>Stratégie</b>		
	St Fitts	St Starts	Ambigua
Avec ouragan ( $p = 0.6$ )	$0.6 \times 5 = 3.0$	-1.2	1.2
Sans ouragan ( $p = 0.4$ )	$0.4 \times 8 = 3.2$	6.4	4.0
Valeur attendue moyenne	6.2	5.2	5.2

un continuum. Et, il devrait être rare de ne pas pouvoir estimer, même approximativement, les probabilités d'un évènement.

**Probabilité variable** Supposons dès lors que des données historiques permettent d'affirmer que sur une période de 20 ans (une révolution), la probabilité d'un ouragan est de 0.6. Il est dès lors possible de calculer, sans doute avec plus de précision, la **valeur attendue moyenne** de chaque scénario (Tableau 2.6). Cette démarche probabilistique permet de tenir compte de toute l'information. Elle consiste donc à :

- Recenser les stratégies et les évènements possibles ;
- Déterminer la probabilité de chaque situation à partir de données, de simulations, de consultations d'experts ou de suppositions éclairées... ;
- Déterminer l'issue de chaque stratégie pour chaque situation possible ;
- Calculer la valeur attendue moyenne pour chaque stratégie :  $\sum [\text{Prob. de l'évènement}] \times [\text{VAN si l'évènement se produit}]$  ;

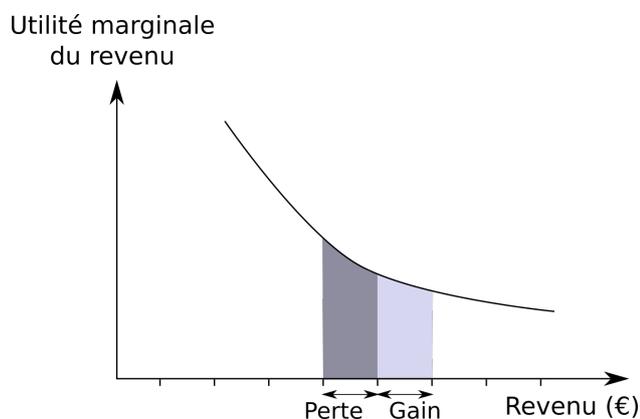


FIGURE 2.13 – Evolution de l'utilité marginale d'un revenu en fonction du montant du revenu. La perte d'utilité engendrée par la perte d'une unité de revenu n'est donc pas équivalente au gain d'utilité d'une unité de revenu supplémentaire.

### 2.7.5 Aversion aux risques

La dernière méthode peut paraître précise mais elle est néanmoins encore incomplète. La plupart des décideurs ont une aversion aux risques. Ils n'apportent pas la même valeur aux deux situations suivantes :

- Investir dans un projet sans risques avec une VAN de 100 000 €.
- Investir dans un projet dont la valeur attendue moyenne est de 100 000 € (Dans 50 % des cas, une valeur inférieure à 100 000 € sera obtenue).

Les décideurs ont tendance à éviter le risque et pourraient donc préférer la première option afin, par exemple, de ne pas devoir justifier un éventuel futur échec. Une explication possible de ce comportement est que l'utilité d'une unité de revenu supplémentaire (utilité marginale) décroît avec le montant du revenu. Un millionnaire n'est pas beaucoup plus heureux lorsqu'il reçoit 10 000 €. Chaque unité supplémentaire a donc une utilité plus faible alors que chaque unité retirée successivement (perte) correspond à une utilité plus importante. Perdre une unité a donc plus d'importance qu'en gagner une (Figure 2.13). Une probabilité donnée de gain d'une unité ne permet donc pas de contrebalancer une perte d'une unité avec la même probabilité.

### **2.7.6 Adaptation aux risques**

On ne peut pas simplement éviter toutes les situations risquées. Chaque propriétaire aura une sensibilité différente (ex. particulier et état). On peut néanmoins s'intéresser aux stratégies qui limitent le risque et améliorent la résilience :

- Assurer le risque. Sur une grande propriété, l'assurance mène à un sur-coût par rapport à l'alternative (supporter le risque). A plus petite échelle, cela permet d'éviter des coûts catastrophiques ce qui peut alors justifier le coût de l'assurance. L'assurance est particulièrement indiquée quand la probabilité d'occurrence de l'aléa est faible et les conséquences (l'enjeu) très importante.
- Utiliser un système sylvicole adaptable (ex. en cas de fluctuation des prix) ;
- Développer un portfolio diversifié.

### **2.7.7 Remarques supplémentaires**

Notons que les exemples vus dans cette section sont très simplistes. Des méthodes économiques pour évaluer des projets forestiers risqués plus élaborées existent mais dépassent le cadre de ce cours. Ce sont des méthodes plutôt utilisées dans le domaine de la recherche et très peu de façon opérationnelle. Retenons que, face à des incertitudes et des risques, il convient de comparer de multiples stratégies et d'effectuer différentes analyses de sensibilité.

### **2.7.8 Illustration**

Les plantations forestières correspondent à des investissements importants d'un point de vue monétaire et qui conditionnent drastiquement le futur d'un peuplement. La mise en oeuvre d'une plantation n'est, néanmoins, pas exempte de risques. L'un d'entre eux est le risque d'abrutissement par les ongulés. Afin de se prémunir de ce risque, le gestionnaire peut choisir de protéger la plantation à l'aide de protections individuelles ou avec l'installation d'une clôture. Pour de petites surfaces plantées, les protections individuelles sont généralement moins coûteuses mais la situation peut s'inverser sur des surfaces plus conséquentes. Quoi qu'il en soit, le coût des protections n'est pas négligeable et il convient de vérifier que ce coût est justifié étant donné le risque d'abrutissement.

Il convient, dans un premier temps, de quantifier ce risque d'abrou-tissement. Imaginons l'exemple suivant (Price, 1989) : suite à des inventaires menés dans des plantations voisines, le gestionnaire a estimé que sans protection les dégâts d'abrou-tissement mènent à la perte de 20 % des plantations de chêne la première année, 15% la deuxième année, 10 % la troisième année et 5 % la quatrième année (Figure 2.14). Sous cette hypothèse, après quatre ans  $80 \times 85 \times 90 \times 95 = 58,1$  % des plantations sont considérées comme réussies. Pour les plantations de hêtre, cette probabilité est estimée à 77,1 %. Les plantations de chêne réussies génèrent 1000 € de revenus actualisés alors que celles de hêtre génèrent seulement 800 € de revenus actualisés.

La valeur actuellement moyenne (VAM) d'une révolution peut donc être calculée en multipliant la probabilité de réussite avec les revenus actualisés et en y soustrayant les coûts initiaux.

$$VAM_{\text{chêne}} = 1000 \times 0,581 - 400 = 181$$

$$VAM_{\text{hêtre}} = 800 \times 0,771 - 400 = 217$$

Sans protection, il apparaît que la VAM est supérieure pour les plantations de hêtre. Ce raisonnement est néanmoins incomplet car il ne tient pas compte de la valeur des révolutions successives ni d'éventuelles replantations. Suite au constat de l'échec d'une plantation, le gestionnaire peut en effet décider de recommencer une nouvelle plantation. Si la plantation est une réussite (dans 58,1 % des cas pour les plantations de chêne), alors la valeur actuelle nette est la somme des revenus nets actualisés de la première révolution ( $VAR_n - C_{(0)}$ ) additionnée de la valeur actuelle nette des cycles ultérieurs ( $VAN_{n \rightarrow \infty}$ ). Si la plantation est un échec après  $i$  année, alors la première révolution pourrait être arrêtée après  $i$  années et de nouveaux cycles de production pourraient débiter à nouveau à cette date. En supposant que les conditions restent inchangées, puisque la plantation est perdue, la valeur de la parcelle à l'année  $i$  redevient égale à la valeur de la parcelle à l'instant 0 (avant la plantation). On peut donc écrire :

$$\begin{aligned} VAM &= p.(VAR_n + VAN_{n \rightarrow \infty}) - C_{(0)} + \sum_{i=1}^{i=n} (1 - p_i).VAN_{i \rightarrow \infty} \\ &= p.(VAR_n + \frac{VAM}{(1+r)^n}) - C_{(0)} + \sum_{i=1}^{i=n} (1 - p_i). \frac{VAM}{(1+r)^i} \end{aligned}$$

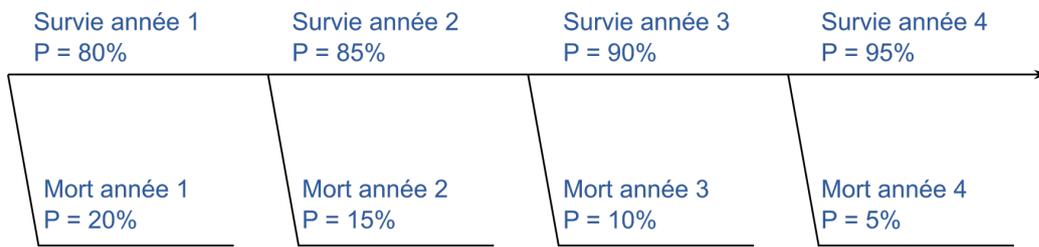


FIGURE 2.14 – Evolution au cours du temps de la probabilité de survie et de mortalité pendant les quatre années qui suivent une plantation.

où  $p$  la probabilité de survie pendant  $n$  année ( $\prod_{i=1}^{i=n} p_i$ ),  $p_i$  la probabilité de survie pour l'année  $i$ ,  $C_{(0)}$  les coûts initiaux,  $VAR_n$ , les revenus actualisés pour le premier cycle de production, et  $VAN_{n \rightarrow \infty}$  la valeur actualisée nette des cycles de productions suivants.

On obtient ainsi pour notre exemple :

$$VAM_{\text{chêne}} = 0,581 \cdot \left( 1000 + \frac{VAM}{(1+r)^n} \right) - 400 + \frac{0,2 \cdot VAM}{(1+r)^1} + \frac{0,15 \cdot VAM}{(1+r)^2} + \frac{0,1 \cdot VAM}{(1+r)^3} + \frac{0,05 \cdot VAM}{(1+r)^4}$$

En posant que  $r = 5\%$ , la résolution de cette équation à une inconnue permet d'estimer que  $VAM_{\text{chêne}} = 320$  et que  $VAM_{\text{hêtre}} = 300$ .

Maintenant que l'on connaît la valeur actuelle moyenne pour des plantations non protégées, on peut s'intéresser à l'intérêt de protéger ces plantations en estimant la valeur actuelle moyenne de plantations protégées. Si les plantations sont protégées, la valeur actuelle moyenne dépend du coût de la protection ( $C_{pr(0)}$ ) :

$$VAM = VAR_n - C_{(0)} - C_{pr(0)}$$

Ceci permet de constater que la pose de protection permet, dans le cas des plantation de chêne, d'obtenir une  $VAM$  supérieure à celle du scénario sans protection tant que les coûts de protection sont inférieurs à 280 € (Figure 2.15). Pour les plantations de hêtre, le coût maximum des protections est estimé à 100 €. Parmi tous les scénarios testés, la plantation de chêne apparaît comme une solution plus avantageuse que la plantation de hêtre (Figure 2.15).

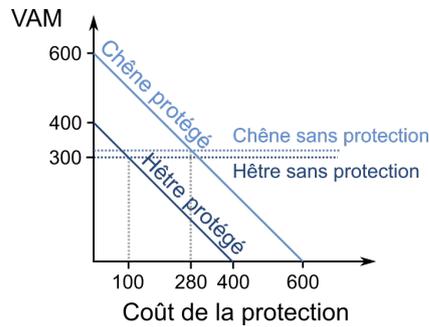


FIGURE 2.15 – Valeur actuelle moyenne (VAM) de plantations de chêne ou de hêtre qui sont soit protégées ou non protégées.

## 2.8 Résumé

- La valeur d'une forêt est une notion complexe et subjective. Elle dépend notamment des circonstances de l'estimation (estimation du patrimoine, vente, dommage, servitude, gestion). Sa valeur est également très différente en fonction des biens, services et acteurs considérés ;
- La valeur vénale d'une forêt est la somme d'au moins deux composantes : le fonds et la superficie ;
- La préférence du consommateur pour le présent doit être prise en compte : c'est le rôle de l'actualisation qui dépend du taux d'actualisation  $r$ .
- La valeur actuelle d'une recette future,  $R$ , est calculée par escompte de la valeur :  $VA = R/(1+r)^t$  ;
- La valeur actuelle d'une dépense,  $D$ , passée est calculée par capitalisation de la valeur :  $VA = D \cdot (1+r)^t$  ;
- La valeur actuelle d'un ensemble des recettes et dépenses d'un investissement forestier est la valeur actuelle nette :  $VAN = \sum_{i=0}^n (R_i - D_i)/(1+r)^i$  ;
- La valeur actuelle d'une annuité à perpétuité est  $VAN_{\infty} = M/r$  ;
- La valeur actuelle d'un cycle de production à perpétuité est  $VAN_{\infty} = VAN_n \cdot (1+r)^n / ((1+r)^n - 1)$  ;
- L'évaluation d'investissements forestiers doit tenir compte des multiples sources d'incertitudes et de risques. Il est possible d'en tenir compte en calculant la valeur attendue moyenne :  $\sum [\text{Prob. de l'évènement}] \times [\text{VAN si l'évènement se produit}]$ . La complexité de la tâche ne doit pas aveugler le décideur pour

autant.

## 2.9 Exercices

### 2.9.1 Exercice 1

Revenons sur l'exemple de la figure 2.4 avec la vente d'une partie de la parcelle 4 (pessière de 35 ans) dans la forêt de la Butte. Mr. Dubois n'a pas trouvé de propriété comparable en épluchant les catalogues de vente. Un expert a évalué la valeur des bois sur pied à 6500 €/ha. Mr. Dubois a également estimé que la somme des coûts de plantation (2750 €) et des soins à la plantation (5300 €) étaient de 8 050 €. Il estime aussi que le peuplement rapportera 50 000 € à 50 ans.

Mr. Dubois a finalement décidé d'abattre tous les arbres et de vendre ensuite le terrain. La vente des bois lui a rapporté 15 000 € et la vente du terrain lui a rapporté 6000 €. Lors de la vente du terrain il a reçu beaucoup d'offres de plus ou moins 4000 € et une offre de 6000 €. Mr. Dubois a choisi cette dernière offre...

Quels termes utiliseriez vous pour qualifier ces différentes valeurs ?

### 2.9.2 Exercice 2

Soit un investissement de 1000 € aujourd'hui. Quelle est, parmi les situations suivantes, la situation la plus avantageuse ?

- recevoir 1100 € dans un an
- recevoir 1300 € dans 3 ans
- recevoir 1600 € dans 5 ans

### 2.9.3 Exercice 3

Une forêt permet de récolter 5 m<sup>3</sup>/ha/an dont le prix moyen de vente est de 20 €/m<sup>3</sup> (100 €/ha/an). Les revenus de la chasse sont de 10 €/ha/an et les frais de gestions et fiscaux sont de 9 €/ha/an. En considérant, ces revenus et dépenses comme des annuités, quelle est la valeur vénale de cette forêt ? Utilisez un taux d'actualisation de 2 %.

**2.9.4 Exercice 4**

La mise à blanc d'un peuplement d'épicéa rapportera 50 000 € dans 40 ans. Quelle est la valeur actuelle de cette recette ? Utilisez un taux d'actualisation de 2 %.

**2.9.5 Exercice 5**

Un projet de plantation avec une espèce productive génère une valeur actuelle nette de 10 000 €. Mais, ce projet est risqué (changements climatiques et dépérissement). Le gestionnaire estime que le projet a 50 % de chance de réussir. Si le projet échoue, la VAN sera de -1000 €. Est-ce que ce projet de plantation est plus intéressant qu'un autre projet de reboisement plus diversifié et non risqué mais dont la valeur actuelle nette est de 5000 € ?

## Chapitre 3

# Estimation de la valeur des services marchands d'une forêt en fonction du traitement sylvicole

Even if a scientific model, like a car, has only a few years to run before it is discarded, it serves its purpose for getting from one place to another.

---

David L. Wingate

### 3.1 Méthodes d'estimation de la valeur vénale

Evaluer avec objectivité la valeur vénale d'un bien est une tâche compliquée puisque la notion est subjective.

Deux approches différentes peuvent être distinguées.

La première consiste à recueillir des données de prix de vente de parcelles forestières. Cette méthode a cependant ses limites car la valeur vénale d'une forêt dépend de multiples caractéristiques. Le problème se simplifie, partiellement cependant, lorsque la parcelle forestière a été déboisée. La valeur de la parcelle est alors égale à

la valeur du fonds. En accumulant suffisamment de données de prix de vente de fonds, il est ainsi possible d'obtenir des estimations intéressantes par régions et potentialité de croissance.

La deuxième méthode, qui est celle développée dans ce chapitre, consiste à estimer la valeur d'une forêt à partir de flux financiers passés et/ou futurs. Cette approche peut paraître plus objective. Cependant, elle nécessite de poser de nombreuses hypothèses, de simplifier et de modéliser les processus en jeu.

## 3.2 Introduction aux traitements sylvicoles

Il existe différents itinéraires sylvicoles et le calcul de la valeur d'une forêt dépendra du traitement considéré. Notamment, les hypothèses de calcul ainsi que la définition du cycle de production variera entre les traitements sylvicoles (Figure 3.1). Pour certains scénarios, il sera possible de calculer la valeur du fonds alors que, pour d'autres scénarios, ce ne sera pas possible.

Dans ce chapitre, nous distinguerons quatre traitements sylvicoles :

- La futaie régulière renouvelée artificiellement par mise à blanc ;
- La futaie régulière renouvelée naturellement avec des coupes progressives ;
- La futaie irrégulière à l'équilibre (ex. gérée avec la méthode du contrôle) ;
- La futaie irrégulière en transformation.

## 3.3 Futaie régulière renouvelée artificiellement par mise à blanc

Une futaie régulière est une futaie composée d'arbres d'âges et de dimensions similaires (Figure 3.2). La distribution de fréquences des diamètres d'une futaie régulière a la forme d'une cloche (distribution approximativement normale). On parle également de futaie équienn<sup>1</sup> qui, par définition, est composée d'arbres de même âge.

Une fois le peuplement suffisamment âgé (ex.  $\pm 20$  ans pour un peuplement résineux en Wallonie), des éclaircies<sup>2</sup> peuvent être pé-

---

1. Even-aged stand

2. Selective thinnings

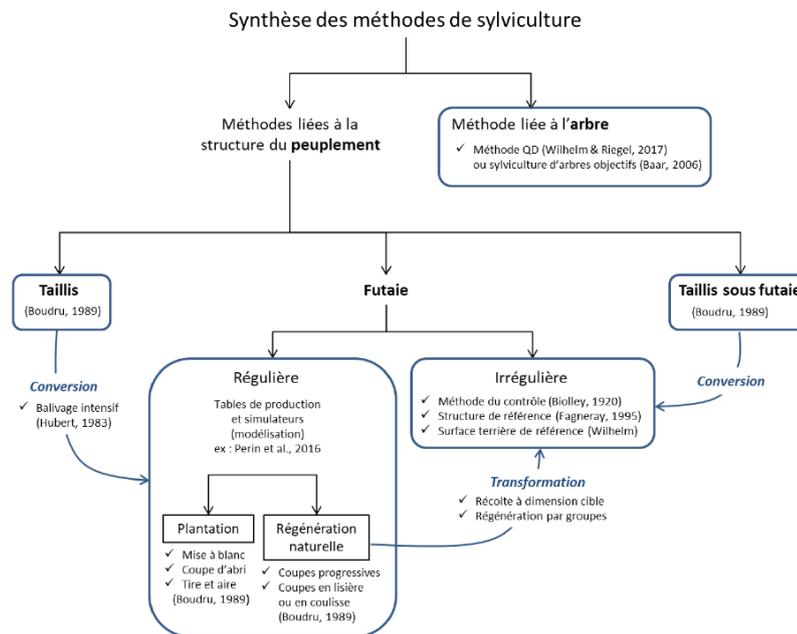


FIGURE 3.1 – Les différents traitements sylvicoles (Claessens, 2019)



FIGURE 3.2 – Futaie équiennne d'épicéa en Ardenne (Belgique).

riodiquement réalisées. La réalisation de ces éclaircies dépend de la productivité du peuplement, de l'autécologie des essences plantées, de la facilité d'accès et de vente des produits d'éclaircies. Il se peut également que les conditions d'accès et de vente soient peu favorables et, par conséquent, aucune ou très peu d'éclaircies sont réalisées.

Lorsque le peuplement est considéré mature, les arbres peuvent être récoltés en une seule coupe, appelée alors la mise à blanc, coupe à blanc, coupe à blanc étoc ou encore coupe rase<sup>3</sup>. Le peuplement peut ensuite être renouvelé à l'aide d'une plantation. Cette dernière est réalisée immédiatement après la coupe à blanc ou parfois reportée d'une ou plusieurs années afin d'éviter des problèmes sanitaires (ex. cas de l'hilobe pour les plantations d'épicéa en Wallonie).

Cet itinéraire peut être répété dans le temps et être considéré comme cyclique (Figure 2.11). La durée du cycle correspond à la révolution<sup>4</sup>. L'intervalle de temps entre deux éclaircies est par contre appelé, en français, la rotation. Le signification du mot rotation est donc différente en français et en anglais.

Percevoir ce scénario comme cyclique est une façon de le modéliser afin de mieux l'analyser. Evidemment, dans la réalité, les gestionnaires forestiers n'envisagent pas forcément de reconduire à perpétuité une même gestion. Cette hypothèse de renouvellement à perpétuité pesera cependant souvent peu dans les calculs de la valeur d'une forêt si les flux financiers sont actualisés. En effet, dans ce cas, la valeur des flux financiers des révolutions suivantes seront très distants dans le temps et leur valeur actualisée devient rapidement négligeable.

### 3.3.1 Valeur au cours du cycle de production

Au cours du cycle de production, la valeur vénale d'une forêt n'est pas constante. Imaginons une parcelle forestière qui vient d'être déboisée. La valeur de cette forêt est alors égale à la valeur du terrain nu (le fonds). Ensuite, la valeur de la forêt augmente car un peuplement s'installe sur le terrain. Même si la valeur marchande des arbres est toujours nulle, la valeur du peuplement augmente car le fonds est immobilisé et les recettes futures seront perçues dans un

---

3. Clear-cut, clear-felling

4. Rotation

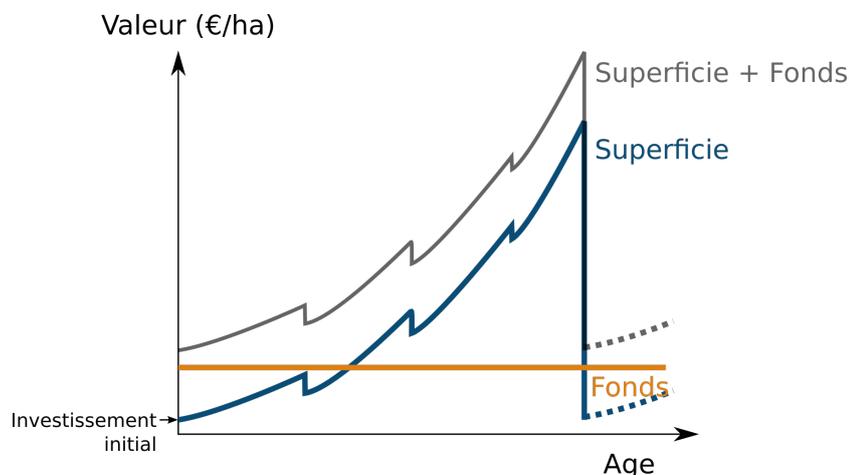


FIGURE 3.3 – Evolution de la valeur d’une futaie équiennne au cours du temps

laps de temps toujours de plus en plus réduit. Éventuellement, un élagage est réalisé. Une fois réalisé, cet investissement supplémentaire augmente la valeur du peuplement. Plus tard, dans la vie du peuplement, des éclaircies seront réalisées. Après chaque éclaircie, la valeur du peuplement diminuera puisqu’une partie du peuplement est récolté. A tout instant, la valeur de la forêt est supposée égale à la somme du fonds et de la valeur des arbres sur pied (appelée la superficie). La valeur du fonds est supposée constante dans le temps alors que la valeur de la superficie évolue constamment (Figure 3.3). Pour rappel, ces calculs sont réalisés à prix constant, hors inflation (cet aspect sera détaillé dans la section 5.3).

La valeur vénale minimum est égale à la valeur du fonds. La valeur vénale maximale est égale à la somme du fonds et de la valeur marchande en fin de révolution.

Trois formules permettent notamment de calculer la valeur d’une forêt à tout instant : la valeur en bloc, la valeur au prix de revient et la valeur d’attente.

### 3.3.2 Conventions d’écriture

Le cycle de production débutera juste avant la plantation, lors de l’instant  $t = 0$  (Figure 3.4). Le cycle de production est considéré comme cyclique, donc l’instant initial ( $t = 0$ ) correspond à instant final ( $t = n^*$ ) du cycle de production précédent (révolution pré-

cédente). Par convention, les dépenses initiale de l'investissement ( $D(0)$ , ex. achat du terrain, frais de plantation) sont imputées à l'instant  $t = 0$  et les autres flux financiers imputés à l'instant  $t = n$  (bien que ces flux sont en réalité perçus la même année). Notons, que des frais de gestion qui correspondent à des frais payés tout au long d'une année ne peuvent pas être imputés à l'instant  $t = 0$ . Si les mêmes frais sont payés chaque année pendant tout le cycle de production, alors ils sont imputés chaque année, de l'instant  $t = 1$  à l'instant  $t = n$ .

Dans certains calculs, nous distinguons également la valeur avant ou après la prise en compte des flux financiers imputés à cet instant. Pour une année  $a$ , la valeur avant et après la prise en compte des flux financiers est indiquée respectivement par :  $V_{(a)}$  et  $V_{(a^*)}$ . Le passage de  $V_{(a)}$  à  $V_{(a^*)}$  est instantané.

Pour être pointilleux sur les termes et pour éviter des confusions, les flux financiers sont imputés à des instants et pas à des années. Ainsi la recette  $R(3)$  est imputée à l'instant  $t = 3$ . Néanmoins, bien que ce soit moins rigoureux, cette recette sera parfois décrite comme une recette de l'année 3. Procéder de cette façon mène à imputer la dépense initiale  $D(0)$  à une année 0 et la recette finale à l'année  $n$ . Pourtant, il ne peut en effet pas y avoir à la fois une année 0 et une année  $n$  dans le même cycle de production car cela mènerait à un cycle de  $n + 1$  années.

### 3.3.3 Formule de la valeur par récurrence

#### Valeur au prix de revient

La formule de la valeur au prix de revient est l'application de l'équation 2.4. La valeur d'une forêt est calculée en additionnant la valeur actualisée initiale de la forêt et tous les flux nets actualisés ( $D_i - R_i$ ) s'étalant de l'instant initial ( $t = 0$ ) jusqu'à l'instant  $t = a$ .

$$V(t = a) = V(t = 0) \cdot (1 + r)^a + \sum_{i=0}^{i=a-1} (D_i - R_i) \cdot (1 + r)^{a-i} \quad (3.1)$$

Cette formule, peut facilement être comprise en calculant la valeur d'une forêt année par année en débutant par le moment avant la plantation (Figure 3.5).

Avant plantation, la valeur est :  $V_{(0)} = F$ .

Après la plantation (supposée instantannée), la valeur est :

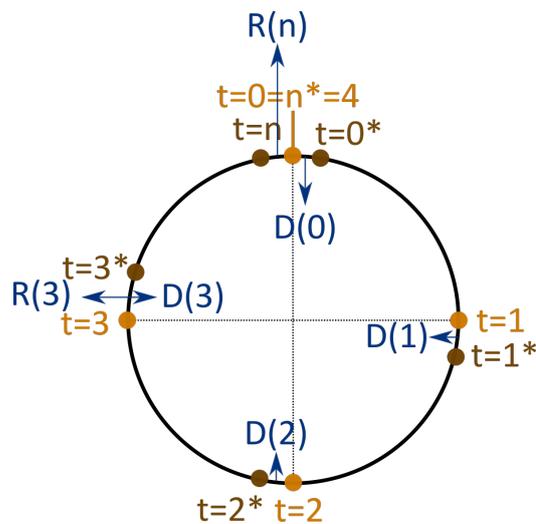


FIGURE 3.4 – Représentation des conventions d'écriture pour un cycle de production de 4 ans. Le cycle débute à l'instant  $t = 0$ . Immédiatement après, la valeur est corrigée pour tenir compte de l'investissement initial ( $D(0)$ ). On obtient  $V(0^*)$ . La valeur est ensuite actualisée pour une période d'une année permettant d'obtenir  $V(1)$ . Des dépenses ( $D(1)$ ) et recettes peuvent être imputées à cet instant. Une fois imputées, on obtient  $V(1^*)$ . Après  $n = 4$  années, la valeur du peuplement est de  $V(n)$  et, immédiatement après la récolte, elle devient  $V(n^*)$ .

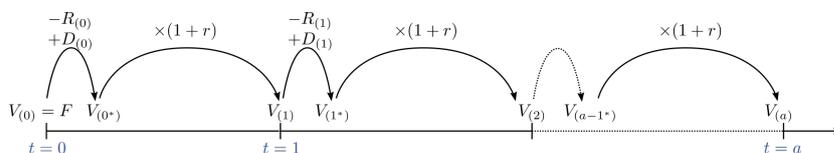


FIGURE 3.5 – Calcul de la valeur vénale avec la méthode au prix de revient

$$V_{(0*)} = F + D_{(0)} - R_{(0)}.$$

Avec par convention  $R_{(0)} = 0$ . Ensuite, après 1 année :  $V_{(1)} = (1+r)(V_{(0)} + D_{(0)} - R_{(0)})$ .

Après avoir imputé les recettes et dépense de l'instant  $t = 1$  :  
 $V_{(1*)} = V_{(1)} + D_{(1)} - R_{(1)}$ .

Et ainsi de suite, après  $a-1$  années :  $V_{(a-1)} = (1+r)(V_{(a-2)} + D_{(a-2)} - R_{(a-2)})$ .

Après  $a$  années :  $V_{(a)} = (1+r)(V_{(a-1)} + D_{(a-1)} - R_{(a-1)})$

### Valeur d'attente

La formule de la valeur d'attente est une application de l'équation 2.3. La valeur d'une forêt est calculée en sommant la valeur actualisée finale de la forêt et tous les flux nets actualisés s'étalant de l'instant  $a$  jusqu'à l'instant  $n^*$ .

$$V(t=a) = \frac{V_{(t=n)}}{(1+r)^{n-a}} + \sum_{i=a}^{i=n} \frac{R_i - D_i}{(1+r)^{i-a}} \quad (3.2)$$

Année par année, on trouve en partant du moment après la mise à blanc que :

La valeur après la mise à blanc est :  $V_{(n*)} = F$ .

Avant la mise à blanc, la valeur est :  $V_{(n)} = V_{(n*)} - D_{(n)} + R_{(n)}$

Après  $n-1$  années :  $V_{(n-1)} = \frac{V_{(n)}}{1+r} - D_{(n-1)} + R_{(n-1)}$

Après  $a+1$  années :  $V_{(a+1)} = \frac{V_{(a+2)}}{1+r} - D_{(a+1)} + R_{(a+1)}$

Après  $a$  années :  $V_{(a)} = \frac{V_{(a+1)}}{1+r} - D_{(a)} + R_{(a)}$

### Hypothèses

Les deux méthodes précédentes ont l'inconvénient de devoir fixer à la fois le taux d'actualisation et la valeur finale (dans le cas de la valeur d'attente) ou la valeur initiale (valeur au prix de revient). Ces deux dernières valeurs sont, dans le cas de la futaie renouvelée par

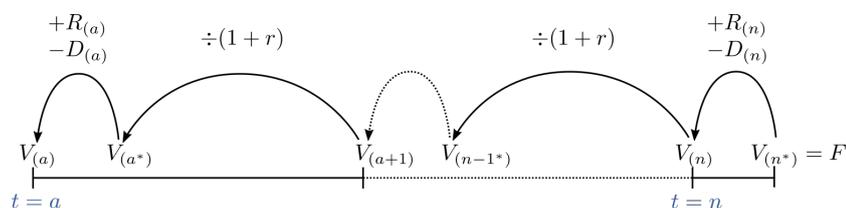


FIGURE 3.6 – Calcul de la valeur vénale avec la méthode de la valeur d'attente

mise à blanc, égales au fonds. Pourtant, pour une valeur de taux d'actualisation, il n'existe qu'une seule valeur de la forêt et donc du fonds. Si les deux valeurs ne sont pas définies rigoureusement, alors la méthode mène à un résultat erroné. Par contre, si des valeurs cohérentes de fonds et de taux d'actualisation sont utilisées, alors les deux méthodes donneront exactement le même résultat.

Ces deux méthodes sont néanmoins parfois utilisées, en fixant à la fois  $F$  (ou  $V_{(n^*)}$ ,  $V_{(0)}$ ) et  $r$  arbitrairement, pour obtenir une approximation si seulement une partie de l'échéancier a pu être obtenu. De telles approximations sont néanmoins très peu rigoureuses puisqu'elles ignorent le lien existant entre  $V_{(0)}$  et  $r$  (Equation 3.4). Elles sont à éviter autant que possible.

Imaginons, par exemple, que l'on souhaite calculer la valeur d'un peuplement de 53 ans dont la mise à blanc est prévue à 58 ans. S'il n'y a pas d'autre flux financier prévu pendant les 5 prochaines années, alors la valeur d'attente du peuplement nécessite de connaître uniquement le montant présumé de la recette de la mise à blanc ( $R_{58}$ ) et de la valeur finale de la forêt dans ce cas égale au fonds ( $F$ ) :

$$V(t = 53) = \frac{R_{58} + F}{(1 + r)^5}$$

A l'inverse, imaginons que l'on souhaite connaître la valeur à 5 ans de la forêt décrite avec l'échéancier présenté dans le tableau 2.1. Pour estimer  $V(t = 5)$ , il est nécessaire de connaître la valeur initiale de la forêt (égale au fonds dans ce cas particulier) et uniquement les trois premières dépenses (préparation du sol/plantation, et les deux dégagements). La méthode de calcul du prix de revient ne nécessite alors pas de connaître les flux financiers courant après l'année 5.

### 3.3.4 Valeur en bloc

#### Définition

La valeur en bloc correspond à l'estimation la plus rigoureuse de la valeur d'une forêt pour un instant donné ( $t = a$ ). Elle correspond à la valeur actualisée de tous les flux nets qui seront perçus depuis l'instant  $t = a$  et jusqu'à l'infini.

Pour une forêt dont la gestion est supposée suivre un cycle de production perpétuel de  $n$  années alors la valeur du peuplement pour l'instant  $a$  est :

$$V(t = a) = \frac{\sum_{i=a}^n (R_i - D_i) \cdot (1+r)^{a+n-i} + \sum_{i=0}^{a-1} (R_i - D_i) \cdot (1+r)^{a-i}}{(1+r)^n - 1} \quad (3.3)$$

Dans le cas de la futaie équienne régénérée par mise à blanc, après la mise à blanc ( $a = n^*$ ) et avant la plantation ( $a = 0$ ), la valeur de la forêt est égale à la valeur du fonds ( $V_{(0)} = V_{(n^*)} = F$ ). L'équation précédente permet dès lors de calculer la valeur du fonds (en fixant  $a = 0$ ). On retrouve la formulation de l'équation 2.8 qui est aussi parfois appelée la formule fondamentale ou la formule de Faustmann. Cette formule permet également de bien comprendre de quoi dépend la valeur du fonds ; il dépend de l'ensemble des flux financiers futures.

$$V(t = 0) = F = \sum_{i=0}^n \frac{(R_i - D_i)}{(1+r)^i} \cdot \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} = \text{VAN}_n \cdot \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (3.4)$$

#### Démonstration

Pour démontrer l'équation 3.3, partons d'un échancier simple composé d'une dépense unique à l'instant 0 ( $D_{(0)}$ ) et d'une recette unique à l'instant  $n$  ( $R_{(n)}$ ). Ces deux flux financiers se répètent à l'infini dans le futur (Figure 3.7).

Conformément à la définition donnée de la valeur en bloc, on ne considère que les flux financiers postérieurs à l'instant  $a$ .

Dans un premier temps, si on ne considère que les deux premiers flux financiers tels que  $t \geq a$  et  $t \leq n$ , on obtient :

$$V_{(a)} = \frac{R_{(n)} - D_{(0)}}{(1+r)^{n-a}} \quad (3.5)$$

Ensuite, si ces deux premiers flux sont répétés à l'infini ( $n \rightarrow \infty$ ), alors la valeur actuelle pour l'instant  $a$  de ces flux est calculée avec l'équation 2.8) et on obtient :

$$V_{(a)} = \frac{R_{(n)} - D_{(0)}}{(1+r)^{n-a}} \cdot \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} = \frac{(R_{(n)} - D_{(0)}) \cdot (1+r)^a}{(1+r)^n - 1} \quad (3.6)$$

Considérons maintenant un échancier plus compliqué composé de multiples recettes et dépenses perçues à différentes années. Afin de réutiliser l'équation 3.5, on va assimiler tous les flux financiers antérieurs à l'instant  $a$  à une dépense équivalente qui serait perçue l'instant 0 ( $D_{(0)}$ ) et tous les flux financiers postérieurs à l'instant  $a$  sont assimilés à une recette perçue à l'instant  $n$  ( $R_{(n)}$ ).  $D_{(0)}$  et  $R_{(n)}$  sont alors calculés de la façon suivante :

$$R_{(n)} = \sum_{i=a}^n (R_{(i)} - D_{(i)}) \cdot (1+r)^{n-i}$$

$$D_{(0)} = \sum_{i=0}^{a-1} (D_{(i)} - R_{(i)}) \frac{1}{(1+r)^i}$$

En remplaçant  $D_{(0)}$  et  $R_{(n)}$  dans l'équation 3.5 avec ces deux nouvelles expressions, on obtient bien à nouveau l'équation 3.3 :

$$V_{(a)} = \frac{\sum_{i=a}^n (R_{(i)} - D_{(i)}) \cdot (1+r)^{n-i} - \sum_{i=0}^{a-1} (D_{(i)} - R_{(i)}) \frac{1}{(1+r)^i}}{(1+r)^n - 1} \cdot (1+r)^a$$

$$V_{(a)} = \frac{\sum_{i=a}^n (R_{(i)} - D_{(i)}) \cdot (1+r)^{n-i} + \sum_{i=0}^{a-1} (R_{(i)} - D_{(i)}) \cdot (1+r)^{-i}}{(1+r)^n - 1} \cdot (1+r)^a$$

$$V_{(a)} = \frac{\sum_{i=a}^n (R_i - D_i) \cdot (1+r)^{a+n-i} + \sum_{i=0}^{a-1} (R_i - D_i) \cdot (1+r)^{a-i}}{(1+r)^n - 1}$$

### Hypothèses

Pour appliquer cette méthode, il est dès lors nécessaire de disposer d'un échancier pour l'entièreté de la période (de l'instant 0 jusqu'à l'instant final  $n^*$ ) qui est supposée se répéter dans le temps. Ces calculs reposent donc notamment sur les hypothèses suivantes (Amacher et al., 2009) :

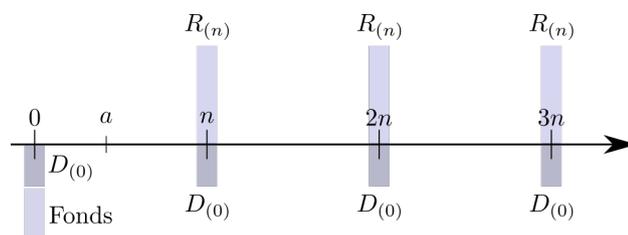


FIGURE 3.7 – Répétition dans le temps d'un cycle de production simple composé seulement d'une dépense initiale et d'une recette finale

- Les dépenses et les recettes sont connues de l'instant 0 à  $n$  ;
- L'évolution des caractéristiques de la forêt est connue (car les dépenses et les recettes en dépendent) ;
- Le cycle de  $n$  années se répète à l'infini ;
- Le taux d'actualisation est connu et constant ;
- Le marché de la vente de forêt est parfait (les propriétaires peuvent toujours vendre leur terrain pour un prix équivalent à la valeur en bloc) ;
- Les marchés d'actifs financiers sont parfaits (ex. concurrence parfaite, pas de coût de transaction, information disponible et gratuite pour tous les acteurs...)

Notons également que ces calculs sont réalisés hors inflation (à prix constant). Il convient donc de ne pas mélanger dans l'échéancier des prix d'années très différentes (ex. coût historique de la plantation en 1950 avec la recette d'une vente de bois actuelle). Les prix devront être corrigés en tenant compte de l'inflation, par exemple, en utilisant des indices des prix à la consommation.

### 3.3.5 Illustration

Repartons de l'échéancier présenté dans le tableau 2.1. Comme il s'agit d'un scénario de gestion pour une futaie régulière régénérée par coupe à blanc, nous pouvons faire l'hypothèse que la même gestion sera répétée de révolution en révolution. Juste avant la plantation ( $t = 0$ ) et après la mise à blanc ( $t = 58^*$ ), la valeur de la forêt est égale à la valeur du fonds. La valeur initiale de la forêt, et donc aussi la valeur du fonds dans ce cas particulier. Elle est calculée avec la formule de Faustmann (Equation 3.4). La valeur obtenue avec un taux d'actualisation de 2 %, est de 9052,73 €/ha. Il s'agit de la

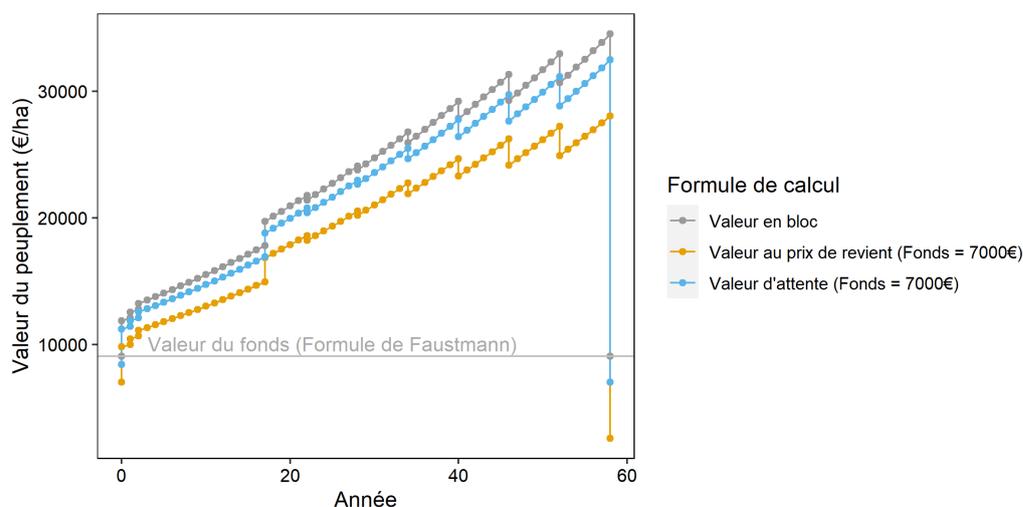


FIGURE 3.8 – Estimation de la valeur d’une forêt décrite à partir de l’échéancier présenté dans le tableau 2.1, soit une futaie équienne régénérée par mise à blanc, et calculée à l’aide des différentes formules et avec un taux d’actualisation de 2 %.

valeur actuelle nette de flux financiers perpétuels ( $VAN_{inf}$ ). Cette valeur est supérieure la valeur actualisée nette calculée sur un seul cycle de  $n$  années :  $VAN_n = 6182,15 \text{ €/ha}$  (Equation 2.6).

Pour ce cas particulier, la formule de la valeur en bloc peut être utilisée pour illustrer l’évolution de la valeur de la forêt pour tout instant  $a$  compris entre  $t = 0$  et  $t = 58$  (Figure 3.8). Notons que l’équation 3.3 permet d’estimer la valeur au début de l’année  $a$ . Si des opérations sont réalisées lors de l’année  $a$ , alors la valeur de la forêt en fin d’année est différente : elle est égale à la valeur en début d’année moins le montant du flux net. La figure 3.8 illustre l’évolution de la valeur de la forêt estimée avec différentes méthodes de calcul. Pour cette illustration, j’ai volontairement choisi d’utiliser une valeur erronée de la valeur initiale ou finale de la forêt (ou encore du fonds) pour respectivement le calcul de la valeur de la forêt au prix de revient ou de la valeur d’attente. La valeur choisie est de 7000 €/ha soit nettement inférieure à la valeur calculée avec la formule de Faustmann (9052,73 €/ha). On note sur cette illustration que l’erreur sur l’estimation du fonds avec la méthode au prix de revient augmente au fur et à mesure du temps. L’erreur est plus faible avec la méthode de la valeur d’attente car l’erreur sur le fonds est faible par rapport à la recette de la mise à blanc.

### **3.4 Futaie équiennne régénérée naturellement avec des coupes progressives**

Différents itinéraires sylvicoles peuvent être conduits pour obtenir une régénération naturelle tout en maintenant une futaie régulière (équiennne). L'itinéraire le plus classique est celui des coupes progressives. Une fois le peuplement mature, des coupes progressives sont réalisées afin d'ouvrir progressivement le couvert et permettre à la régénération de s'installer rapidement (Figure 3.9). La première des coupes progressives est appelée coupe d'ensemencement. Elle vise à ouvrir le peuplement et à stimuler la fructification des semenciers. Avant cette coupe, il n'y a pas encore de semis. Ceux-ci s'installent rapidement dans les années qui suivent la coupe d'ensemencement. Une ou plusieurs coupes secondaires sont ensuite effectuées afin d'apporter assez de lumière dans le sous-bois et de permettre aux semis de se développer. Enfin, la coupe finale est réalisée, elle prélève tous les arbres adultes. Cette coupe est réalisée en préservant au maximum les semis installés.

Contrairement au traitement sylvicole précédent, la valeur de la forêt n'est jamais égale à la valeur du fonds puisque le terrain n'est jamais complètement déboisé (la valeur de la superficie est toujours supérieure à zéro).

#### **3.4.1 Cycle de production**

Le cycle de production peut, comme dans le cas précédent, se répéter dans le temps. La durée du cycle est néanmoins plus courte que l'âge des derniers arbres prélevés. Il s'agit de l'âge des derniers arbres prélevés moins la durée couverte par les coupes progressives.

Considérons que la durée du cycle de production, contenant une seule fois tous les flux financiers, est de  $n$  années. L'instant 0 correspond (de manière arbitraire) à l'instant avant la coupe d'ensemencement. A ce moment particulier, le peuplement ne contient pas de semis. La valeur de la superficie dépend donc uniquement de la valeur des arbres sur pied (leur valeur marchande et leur perte d'avenir).

La valeur du peuplement l'instant 0 est alors égale à somme de la valeur du fonds et de la superficie :



FIGURE 3.9 – Aperçu d'une pineraie dans les landes après la première coupe d'ensemencement.

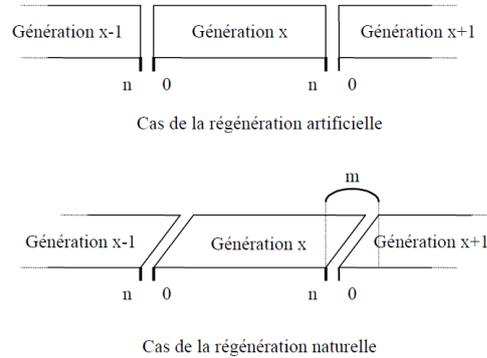


FIGURE 3.10 – Définition de la durée du cycle de production dans le cas de coupes progressives. Le cycle qui se répète dans le temps est plus court que l'âge maximum des arbres.

$$\begin{aligned}
 V_{(0)} &= \mathbf{F} + \mathbf{S}_{(0)} & (3.7) \\
 &= \mathbf{F} + \text{Recettes actualisées liées à la récolte des bois matures} \\
 &= \mathbf{F} + \sum_{i=n}^{n+m} R_{(i)}(1+r)^{-i}
 \end{aligned}$$

### 3.4.2 Illustration

A partir l'échéancier du tableau 3.1, nous pouvons calculer la valeur en bloc de l'instant 0 ( $V_{(0)} = V_{(n^*)}$ ) avec l'équation 3.4.

$$V_{(0)} = V_{(n)} = \sum_{i=0}^n \frac{(R_i - D_i)}{(1+r)^i} \cdot \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} = 34371$$

Ce calcul est facile à effectuer, par exemple, en suivant la démarche illustrée dans le tableau 3.1. La valeur obtenue est de 34 371 €/ha. Cette valeur correspond à la somme de la valeur du fonds et de la valeur de la superficie. Cette dernière peut être estimée puisque l'on connaît toutes les recettes qui découlent des bois présents lors de l'instant 0. Elle est estimée à 32 641 €/ha en additionnant la valeur actuelle de ces recettes :

$$S_{(0)} = \sum_{i=0}^{19} R_{(i)}(1+r)^{-i} = 6000 + 5654 + 6094 + 5630 + 4458 + 4805 = 32641$$

La valeur du fonds peut ainsi donc être calculée puisque la superficie initiale et la valeur initiale ont pu être calculées (Equation 3.7) :  $F = V_{(0)} - S_{(0)} = 1730 \text{ €/ha}$ .

Nous pouvons aussi calculer la valeur en bloc pour chaque année en utilisant l'équation 3.3, la méthode au prix de revient (Equation 3.1) ou la méthode de la valeur d'attente (Equation 3.2). L'utilisation de ces deux dernières méthodes demande néanmoins de définir  $V_{(0)}$  ou  $V_{(n)}$  et le taux d'actualisation. Etant donné que  $V_{(0)}$  vient d'être calculée avec un taux d'actualisation de 2 %, nous pouvons calculer la valeur en bloc en utilisant la formule au prix de revient de la façon suivante :

$$\begin{aligned} V_{(0)} &= F + S_{(0)} = 1730 + 32641 = 34371 \\ V_{(0^*)} &= V_{(0)} - R_{(0)} = 34371 - 6000 = 28371 \\ V_{(1)} &= V_{(0^*)} \cdot (1 + r) = (V_{(0)} - R_{(0)} + D_{(0)}) \cdot (1 + r) \\ &\dots\dots \\ V_{(a)} &= (V_{(a)} - R_{(a)} + D_{(a)}) \cdot (1 + r) \end{aligned}$$

Notons que pour cet exemple, nous avons choisi une valeur de taux d'actualisation et nous avons ensuite calculé les valeurs de  $V_{(0)}$  et du fonds correspondant. Il était également possible de faire l'approche inverse : choisir une valeur de fonds et estimer la valeur du taux d'actualisation correspondante. Par exemple, on peut calculer la valeur du taux d'actualisation correspondant à un fonds 2500 €. Le calcul du taux d'actualisation est néanmoins légèrement plus complexe car il n'est pas possible d'isoler  $r$  dans l'équation 3.4. La solution est obtenue numériquement, en testant de nombreuses valeurs de  $r$ , idéalement en utilisant des outils d'optimisation, jusqu'à obtenir une solution satisfaisante. Plus concrètement, il s'agit de :

- choisir une valeur temporaire du taux d'actualisation ;
- calculer l'évolution de la valeur en bloc avec la formule de la valeur d'attente, de la valeur au prix de revient ou de la valeur en bloc ;
- calculer  $r$  tel que  $V_{(0)} = V_{(n^*)}$ .

Une autre solution, sans doute plus rapide à mettre en oeuvre, consiste à estimer  $r$  en calculant le taux interne de rentabilité TIR2. Cette notion sera présentée dans la section 4.7.

TABLE 3.1 – Échéancier utilisé pour illustrer le calcul de la valeur gérée en futaie régulière et régénérée naturellement avec des coupes progressives et illustration du calcul de la valeur d'une forêt gérée avec des coupes progressives immédiatement avant la coupe d'ensemencement. Le taux d'actualisation utilisé est de 2 %.

$t$	Opération	Dépense	Recette	$(R_{(i)} - D_{(i)})/(1+r)^i$
0	Coupe d'ensemencement		6000	6000
3	Coupe d'ensemencement		6000	5654
7	Coupe d'ensemencement		7000	6094
11	Coupe d'ensemencement		7000	5630
15	Coupe d'ensemencement		6000	4458
19	Coupe finale		7000	4805
24	Travaux d'entretien	3000		-1865
28	Travaux d'entretien	2000		-1149
100				0
$\sum (R_{(i)} - D_{(i)})/(1+r)^i$				29627
$V_{(0)} = V_{(n)}$				34371

### 3.5 Futaie inéquienne à l'équilibre

Les futaies inéquiennes sont des futaies composées d'arbres d'âges différents (Figure 3.11). Elles sont dites à l'équilibre lorsque leur structure, notamment caractérisée par la distribution de fréquence de la taille des arbres, est stable dans le temps. Cette dernière caractéristique est notamment possible que si, pendant une période donnée, le nombre d'arbres recrutés est approximativement égal à la somme des arbres prélevés et morts. La régénération doit donc se développer en continu. Certaines hêtraies en Ardennes, ou des hêtraies-pessière-sapinière en montagne sont par exemple maintenues avec une telle structure à l'équilibre.

Ces peuplements sont également caractérisés de futaies jardinées. Des éclaircies sélectives sont périodiquement effectuées. A chaque rotation, des arbres de dimensions très différentes sont récoltés. Des normes ont d'ailleurs été établies pour identifier le nombre théorique d'arbres à maintenir dans chaque classe de circonférence. Par exemple, une norme simple est celle proposée par de Liocourt :

$$N(d) = N_{tot} \cdot e^{-k \cdot d}$$

où  $N(d)$  le nombre d'arbres après coupe par classe de diamètre  $d$ ,



FIGURE 3.11 – Illustration d'une futaie inéquienne à l'équilibre. On observe des arbres de toutes tailles et un développement continu, dans le temps, de la régénération.

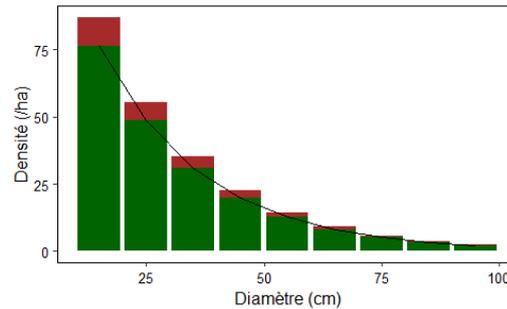


FIGURE 3.12 – Distribution du nombre de tiges par classe de diamètre dans une futaie à l'équilibre après (en vert) et avant la coupe (somme des parties en vert et en rouge). La ligne indique la norme proposée par de Liocourt avec  $N_{tot} = 150$  et  $k = 0.045$ .

$N_{tot}$  le nombre total d'arbres dans le peuplement.  $k$  est un paramètre à ajuster (Figure 3.12). Pour appliquer cette norme, le gestionnaire doit, avant le martelage, inventorier le peuplement afin de définir le nombre de tiges par classe de grosseur. Il compare ensuite ce nombre de tiges observé avec le nombre de tiges théorique indiqué par la norme. Il peut ainsi calculer le nombre d'arbres à prélever dans chaque classe de grosseur. Il s'agit de l'application de la méthode du contrôle.

### 3.5.1 Cycle de production

Le cycle de production le plus court correspond à une rotation. Ce choix correspond à faire l'hypothèse que la structure et la composition initiale et finale sont les mêmes et que toutes les dépenses et recettes sont bien similaires d'une rotation à l'autre. L'état initial peut, par exemple, correspondre à la situation après une éclaircie. Si la rotation est de  $a$  années, alors l'état final correspondra à la situation après l'éclaircie sélective suivante,  $a$  années après l'état initial.

Eventuellement, le cycle de production peut également être composé de plusieurs rotations ( $n \times a$ ). Définir le cycle de production avec plusieurs rotations pourrait être particulièrement pertinent si certaines dépenses ou recettes (ex. travaux forestiers réalisés une rotation sur deux) ne sont pas perçues à chaque rotation. Ce cas de figure semble néanmoins anecdotique.

A tout instant des arbres sont présents dans le peuplement et le

TABLE 3.2 – Exemple d'échéancier pour une futaie irrégulière à l'équilibre. Les coupes rapportent 5040 €/ha tous les 12 ans et des frais de gestions de 50 €/ha/an sont perçus tous les ans, par convention, à l'instant 1 à l'instant 24. La durée du cycle de production choisie est de deux rotations. Les estimations obtenues auraient été les mêmes si le cycle avait été défini par une seule rotation.

$t$	Recette	Dépense	$(R_{(i)} - D_{(i)})/(1+r)^i$
0	0	0	0
1	0	50	-49,4
...	...	...	...
11	0	50	-43,9
12	5040	50	4 324,5
...	...	...	...
23	0	50	-38,0
24	5040	50	3 747,7
$\sum_i (R_{(i)} - D_{(i)})/(1+r)^i$			7 115,8
$V_{(0)} = V_{(24)}$			28 583,0

terrain n'est jamais nu. La valeur de la forêt n'est donc jamais égale à la valeur du fonds. La valeur du fonds ne pourra d'ailleurs pas être estimée.

### 3.5.2 Illustration

Soit une futaie jardinée dans laquelle une coupe est réalisée tous les 12 ans (rotation). Chaque coupe rapporte 5040 €/ha. On suppose également des frais de gestion de 50 €/ha/an (Tableau 3.2). En appliquant l'équation 3.4, on obtient la valeur initiale du peuplement ( $V_{(0)} = V_{(n)} = F + S_{(0)}$ ); cette valeur est de 28 533 € si le taux d'actualisation est de 1.2 %. Cette valeur correspond à la valeur actuelle nette de tous les flux financiers futurs jusqu'à perpétuité.

L'évolution de la valeur de la forêt au cours du temps peut être calculée avec l'équation 3.3 de la valeur en bloc, avec la méthode au prix de revient (Equation 3.1) ou la méthode de la valeur d'attente (Equation 3.2).

## 3.6 Futaie en transition

De nombreuses futaies ne peuvent pas être considérées comme des futaies équiennes ou inéquiennes à l'équilibre car leur structure et composition ne correspondent pas (Figure 3.13) ou bien car leur gestion ne suit pas les principes énoncés pour ces deux cas de figure.

Bien que les futaies régulières d'épicéa soient conventionnellement régénérées par mise à blanc, de plus en plus d'alternatives sont envisagées. Le gestionnaire peut, par exemple, choisir d'irrégulariser le peuplement et de favoriser le développement continu de la régénération naturelle en réalisant périodiquement des coupes sélectives et en évitant la coupe à blanc. Il pourrait également choisir de faire une coupe à blanc afin de modifier la composition du peuplement (ex. régénération naturelle de bouleau, plantation de chêne, ...). Dans tous ces cas de figure, la structure et/ou la composition du peuplement est modifiée.

### 3.6.1 Cycle de production

#### Sans cycle de production perpétuel

Le cas le plus simple, consiste à supposer qu'il n'est pas possible d'identifier un cycle de production perpétuel. L'état final est différent de l'état initial. Il est alors possible de calculer la valeur actuelle nette pour les  $n$  années ( $VAN_n$ ) du scénario mais il n'est pas possible de calculer la valeur actuelle nette pour un horizon de temps infini ( $VAN_\infty$ ). Les équations 3.4 et 3.3 ne sont donc pas applicables.

#### Avec un cycle de production perpétuel

Dans certains cas, un cycle perpétuel peut néanmoins être identifié après une période de transition. Il est supposé que le peuplement évolue pendant une période de transition de  $m$  années. Cette période est ensuite suivie d'une période de  $n$  années qui est considérée comme cyclique et perpétuelle.

La valeur initiale du peuplement est alors égale à la somme des revenus nets actualisés des  $m$  premières années et des revenus qui seront perçus après les  $m$  années et jusqu'à perpétuité.



FIGURE 3.13 – Aperçu d'un peuplement mélangé de douglas, mélèze et épicéa. La structure de ce peuplement devra évoluer durant un certain nombre d'années avant de pouvoir être considérée comme cyclique.

La valeur actuelle des  $m$  premières années ( $\text{VAN}_{0 \rightarrow m}(t = 0)$ ) est estimée simplement en utilisant l'équation 2.6 :

$$\text{VAN}_{0 \rightarrow m}(t = 0) = \sum_{i=0}^m (R_{(i)} - D_{(i)}) \cdot (1 + r)^{-i}$$

Les revenus qui suivent l'instant  $m$  dépendent des recettes et des dépenses qui sont perçues entre l'instant  $m$  et  $m + n$ . Il s'agit en outre de flux financiers supposés se répéter à l'infini. L'équation 3.4 permet de calculer la valeur actuelle nette de ces flux financiers pour l'instant initial du cycle ( $\text{VAN}_{m \rightarrow m+n}(t = m)$ ).

$$\text{VAN}_{m \rightarrow \infty}(t = m) = \sum_{i=0}^n \frac{R_{(i)} - D_{(i)}}{(1 + r)^i} \cdot \frac{(1 + r)^n}{(1 + r)^n - 1}$$

où  $i$ , l'indice de la somme qui varie de 0 à  $n$  et pas de  $m$  à  $m + n$ . Dans le cas présent, le cycle de production perpétuelle n'est obtenu qu'après une période de transition de  $m$  années. La valeur actuelle précédemment obtenue doit donc être actualisée pour obtenir la valeur correspondante à l'instant initial du scénario (au début de la période de transition) :

$$\text{VAN}_{m \rightarrow \infty}(t = 0) = \text{VAN}_{m \rightarrow \infty}(t = m) \cdot (1 + r)^{-m}$$

### 3.6.2 Illustration

Soit une sapinière régulière que le gestionnaire souhaite irrégulariser.

Pendant une période de transition de 60 ans, des éclaircies sélectives sont réalisées tous les 12 ans. Ces éclaircies permettent d'augmenter la lumière disponible dans le sous-bois afin d'obtenir un développement continu de la régénération. Les éclaircies prélèvent surtout les arbres de plus grandes dimensions afin d'obtenir, en fin de période de transition, un peuplement dont la distribution des tiges par classe de grosseurs s'apparentent à celle d'une futaie inéquienne à l'équilibre.

Après 60 ans, le peuplement atteint une structure à l'équilibre. L'état du peuplement est identique après chaque coupe et les recettes et dépenses se répètent à chaque rotation.

Les revenus nets de cet itinéraire sont décrits dans l'échéancier du tableau 3.3.

TABLE 3.3 – Echancier d’une futaie en transition. La gestion du peuplement est définie à l’aide d’une période de transition de 60 années. La rotation suivante (de 12 ans) est supposée se répéter indéfiniment. Le taux d’actualisation utilisé est de 2%.

$t$	Période	Revenus nets	Revenus nets actualisées
0	Transitoire	0	0
12	Transitoire	8000	6308
24	Transitoire	3000	1865
36	Transitoire	4000	1961
48	Transitoire	4500	1739
60	Transitoire	5000	1524
72	Cyclique	5000	

La valeur actuelle nette du scénario dépend des revenus actualisés de la période de transition et du cycle perpétuel :

$$VAN_{0 \rightarrow \infty}(t = 0) = VAN_{0 \rightarrow 60}(t = 0) + VAN_{60 \rightarrow \infty}(t = 0)$$

La valeur actuelle des revenus de la période de transition est calculée simplement en sommant les revenus nets actualisés. Avec un taux d’actualisation de 2 %, on obtient une valeur de 13 397 € :

$$VAN_{0 \rightarrow 60}(t = 0) = \frac{8000}{1.02^{12}} + \frac{3000}{1.02^{24}} + \frac{4000}{1.02^{36}} + \frac{4500}{1.02^{48}} + \frac{5000}{1.02^{60}} = 13397$$

La valeur de la forêt au début de la période cyclique dépend des flux financiers futurs. Dans cet exemple, des revenus nets de 5000 € sont perçus tous les 12 ans ( $n = 12$ ). Cette durée correspond également à la durée du cycle de production perpétuel (une rotation pour une futaie inéquienne à l’équilibre). La valeur de la forêt au début de la période cyclique est alors calculée avec l’équation 3.4 :

$$VAN_{60 \rightarrow \infty}(t = 60) = \frac{5000}{(1 + 0.02)^{12}} \cdot \frac{(1 + 0.02)^{12}}{(1 + 0.02)^{12} - 1} = 18640$$

La valeur de la forêt au début de la période de transition est ensuite calculée en sommant la valeur actualisée des deux périodes. La valeur actuelle de la période cyclique  $VAN_{60 \rightarrow \infty}(t = 60)$  est alors assimilée à une recette à imputer à l’instant  $t = 60$ .

$$VAN_{0 \rightarrow \infty}(t = 0) = 13397 + \frac{18640}{(1 + 0.02)^{60}} = 13397 + 5681 = 19078$$

On note que l'estimation de la valeur pour la période cyclique ( $\text{VAN}_{60 \rightarrow \infty}(t = 60)$ ) a finalement une importance réduite sur l'estimation de la valeur au début de la période de transition (30 %). L'importance l'estimation de la valeur pour la période cyclique est d'autant plus faible que la période de transition est longue et le taux d'actualisation élevé. Dans cet exemple donné, la valeur actualisée de  $\text{VAN}_{60 \rightarrow \infty}(t = 60)$  est 5681 € alors que la valeur actualisée de la première coupe de la période de transition est de 6308 €.

Il est également important de noter que le revenu net de 5000 € perçu à 60 ans a été inclus dans les revenus de la période de transition. L'échéancier aurait pu être défini autrement mais dans tous les cas, il serait erroné d'inclure un même flux financier à la fois dans la période de transition et dans la période cyclique. Il serait également erroné d'inclure dans la période cyclique à la fois les revenus de l'instant  $t = 60$  et de l'instant  $t = 72$  sans modifier la durée du cycle de production.

La mise au point de tels scénarios ainsi que le calcul des flux financiers nécessite bien souvent d'utiliser des outils de simulation. Il conviendra de vérifier avec ces derniers que les hypothèses de calcul sont bien vérifiées et notamment que l'état initial et l'état final de la période cyclique sont bien similaires (Figure 3.14).

### 3.7 Résumé

Au cours de ce chapitre, nous avons finalement uniquement appliqué les formules du chapitre précédent. Ces formules, nous ont permis de trouver les formules de la valeur en bloc (Equations 3.3) et de la valeur initiale (Equation 3.4, Formule de Faustmann) d'un peuplement.

Quatre cas de figure ont été observés. Dans les quatre cas, la formule Faustmann (Equation 3.4) a notamment été utilisée, sous réserve de certaines hypothèses, afin d'estimer la valeur actuelle nette à perpétuité des flux financiers s'étalant de l'instant  $t = 0$  à  $t = \infty$ . La valeur obtenue est égale au fonds uniquement pour le premier cas de figure (futaie régulière régénérée par coupe à blanc).

Nous avons montré comment utiliser ces formules pour des itinéraires sylvicoles particuliers. Il convenait de caractériser correctement le cycle de production, leur flux financiers, leur caractère perpétuel ou non et certaines dates clefs.

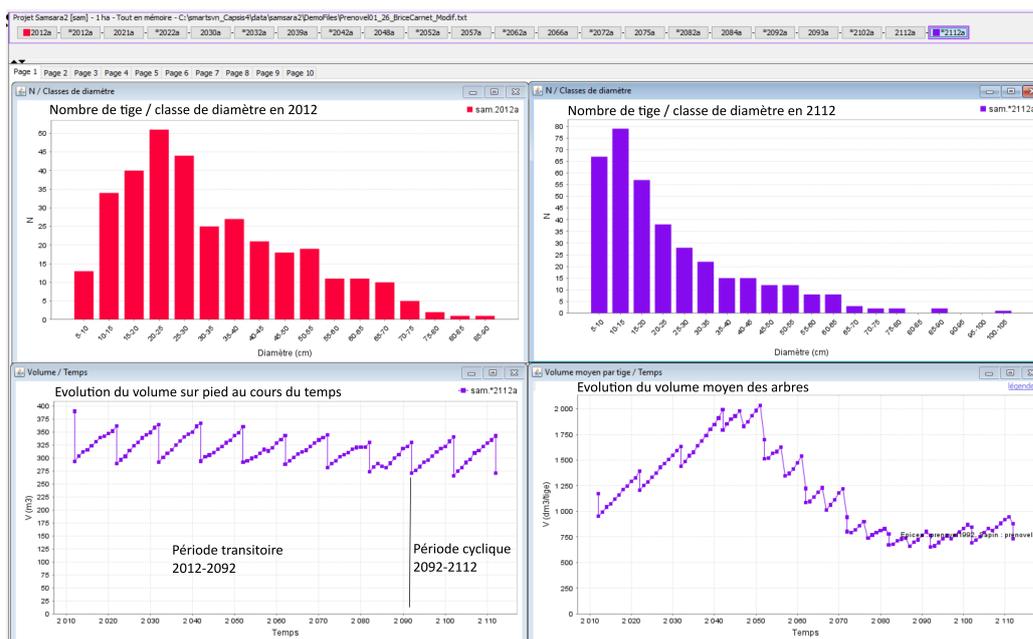


FIGURE 3.14 – Capture d'écran avec les résultats d'une simulation d'une hêtraie-sapinière de montagne. La gestion de ce peuplement est divisée en deux périodes : une période de transition de 2012 à 2092 et une période cyclique de 2092 à 2112. On observe que volume total et le volume moyen évolue peu pendant la période cyclique conformément aux hypothèses. La structure du peuplement a par contre bien évolué entre 2012 (histogramme de gauche en rouge) et 2092 (à droite en bleu).

**Futaie équienne avec mise à blanc** La période cyclique correspond à la révolution. La valeur initiale de la forêt est égale au fonds si l'état initial correspond à l'état après la mise à blanc et avant la plantation.

**Futaie équienne sans mise à blanc** La période cyclique correspond à l'intervalle entre deux régénérations ( $n$  années) alors que les arbres matures sont récoltés pendant  $n + m$  années.

**Futaie inéquienne à l'équilibre** La période cyclique correspond à une ou plusieurs rotations ( $n$  années).

**Futaie en transition** La période cyclique n'est obtenue qu'après  $m$  années et la valeur obtenue doit être actualisée avec les dépenses et recettes de la période transitoire.

## 3.8 Exercice

### 3.8.1 Exercice 1

Une parcelle de douglas est sujette à discussion entre deux experts afin d'estimer au mieux sa valeur, dans le cas d'une vente de gré à gré. Il est prévu de récolter le peuplement après 60 ans en suivant l'itinéraire sylvicole décrit avec l'échéancier du Tableau 3.4. En utilisant un taux d'actualisation de 2 %,

- calculez la valeur en bloc du peuplement à 25 ans ;
- calculez la valeur du fonds et de la superficie à 25 ans ;
- construisez la courbe de l'évolution de la valeur en bloc de 0 à 60 ans ;
- discutez comment l'estimation de la valeur de la forêt à 25 ans serait impactée si la parcelle venait à être classifiée selon un statut de protection (ex. Natura 2000) empêchant de replanter des résineux à la prochaine révolution.

TABLE 3.4 – Echancier de la gestion d'une parcelle de futaie équiennne de douglas régénérée par mise à blanc et plantation.

<i>t</i>	<b>Opération sylvicole</b>	<b>Flux net (€/ha)</b>
0	Plantation/prépa terrain	-2800
1	Dégagement	-400
2	Dégagement	-400
19	Elagage de pénétration	-1900
20	Eclaircie	50
21	Elagage en hauteur	-900
25	Eclaircie	200
30	Eclaircie	200
35	Eclaircie	500
40	Eclaircie	1000
45	Eclaircie	1000
50	Eclaircie	2800
60	Mise à blanc	37000

### 3.8.2 Exercice 2

Un incendie a détruit une plantation de douglas de 13 ans et de 0,65 ha. La valeur du fonds a été estimée à 4000 €/ha avec un taux d'actualisation de 2,7 % et les dépenses depuis la plantation sont recensées dans le tableau 3.5. Estimez la valeur du préjudice subi par le propriétaire.

TABLE 3.5 – Echancier des 13 premières années d'une plantation de douglas ayant été détruite par un incendie.

<i>t</i>	<b>Opération sylvicole</b>	<b>Flux nets (€/ha)</b>
0	Préparation du sol/plantation	-2,700
1	Dégagement	-900
2	Dégagement	-900
4	Dégagement	-900

### 3.8.3 Exercice 3

Un propriétaire voudrait estimer la valeur d'un peuplement pour lequel il estime que pendant les 20 prochaines années, les bénéfices

seront nuls. A partir de la vingtième année incluse, il estime que le peuplement sera une futaie inéquienne à l'équilibre qui permettra de générer des bénéfices de 3000 €/ha lors de chaque coupe. La rotation, période de temps entre les coupes, est de 6 ans. En utilisant un taux d'actualisation de 2 %, calculez la valeur de la forêt avant la coupe à la vingtième année ainsi que la valeur actuelle de la forêt.

# Chapitre 4

## Indicateurs de gestion

De multiples indicateurs peuvent être utilisés pour caractériser la rentabilité d'un projet d'investissement forestier. Ces indicateurs dépendent de plusieurs hypothèses et, en fonction des situations, seuls certains d'entre eux sont pertinents.

Certains de ces indicateurs se distinguent de ceux utilisés dans le monde de la finance étant donné les caractéristiques des investissements forestiers. La gestion forestière est souvent multifonctionnelle et les investissements s'étalent en général sur des périodes de temps relativement longues avec des interventions, dépenses et recettes également étalées dans le temps. Les critères de rentabilité visent à résumer l'ensemble des caractéristiques d'un investissement (critère synthétique) en une seule valeur (unicité du critère). Ceci permet alors de comparer aisément plusieurs scénarios de gestion (ex. scénarios de révolutions différentes, avec ou sans la réalisation d'un élagage).

Il est néanmoins rare que le choix d'un itinéraire de gestion ne repose que sur un seul indicateur. Par nature, les indicateurs simplifient et résument la complexité d'un problème. Il conviendra parfois de calculer plusieurs indicateurs et/ou d'effectuer des analyses de sensibilité.

Dans ce chapitre, le calcul des indicateurs sera illustré, par simplicité, en considérant uniquement la rentabilité de la production de bois, un service écosystémique parmi d'autres. Toutefois, il convient de rappeler qu'une évaluation complète d'un projet forestier devrait toujours reposer sur l'évaluation de tous les services écosystémiques éventuellement impactés.

## 4.1 Indicateurs de production et d'accumulation

Dans certains cas, un gestionnaire forestier pourrait désirer maximiser les volumes produits ou encore les recettes pour toute la durée du projet d'investissement et ce, sans prendre en compte à quel moment ces volumes sont produits ou ces recettes sont perçues (sans actualisation). C'est parfois le cas dans un but d'optimisation de services écologiques et sociaux. Le coût de l'immobilisation des capitaux est alors ignoré.

De tels indicateurs sont, par exemple, le volume total de bois récolté (VT), le volume annuel moyen de bois récolté (VM), la somme des recettes perçues (RT), le montant annuel moyen des recettes perçues (RM), la somme des bénéfices perçus (BT), le montant annuel moyen des bénéfices perçus (BM).

$$VT = \sum_i^n V_i$$

$$VM = \sum_i^n \frac{V_i}{n}$$

$$RT = \sum_i^n R_i$$

$$RM = \sum_i^n \frac{R_i}{n}$$

$$BT = \sum_i^n R_i - D_i$$

$$BM = \sum_i^n \frac{R_i - D_i}{n}$$

où  $R_i$  et  $D_i$  sont les recettes et dépenses de l'année  $i$  et  $n$  le nombre d'années du scénario.

## 4.2 Valeur actuelle nette

La valeur actuelle nette ( $VAN_n$ ) d'un scénario de  $n$  années peut servir d'indicateur de rentabilité. Un projet sera qualifié de rentable

si  $VAN_n > 0$  car cela signifie que les recettes actualisées sont supérieures aux dépenses actualisées (pour un taux d'actualisation donné). Plus  $VAN_n$  est élevée, meilleure est la rentabilité du projet. Cet indicateur ne permet cependant pas de comparer la rentabilité de projets d'investissement de durées différentes.

Cet indicateur est également appelé le bénéfice actualisé simple (BAS) dans certains manuels francophones. Le calcul de la valeur actuelle nette (Équation 2.6) correspond à la somme des flux nets actualisés :

$$VAN_{0 \rightarrow n}(t = 0) = \sum_{i=0}^n \frac{R_i - D_i}{(1 + r)^i}$$

### 4.3 Valeur actuelle nette avec immobilisation du capital initial

Dans certains cas, on ajoute à l'échéancier une dépense l'instant 0 correspondant à l'achat de la forêt (le fonds s'il n'y a pas d'arbres sur pied) et une recette l'année  $n$  égale à la valeur de la forêt correspondant à la vente de cette dernière. Contrairement à la définition précédente de la valeur actuelle nette, cet indicateur (VAN2) tient compte du coût de l'immobilisation d'un capital égal à la valeur initiale de la forêt. Pour un taux d'actualisation donné, la valeur de cet indicateur est donc plus faible que celle de la valeur actuelle nette ( $VAN2 < VAN$ ). Cet indicateur permet de comparer rigoureusement que des projets de même durée. Cet indicateur a néanmoins l'inconvénient de devoir définir à la fois la valeur initiale ( $V(t = 0)$ ) et finale de la forêt ( $V(t = n)$ ) ainsi que le taux d'actualisation (Equation 4.1).

En outre, si  $r$ ,  $V(t = 0)$  et  $V(t = n)$  sont rigoureusement calculés, alors  $VAN2 = 0$ . En effet, dans l'équation 4.1, le premier terme correspond à la valeur actuelle des flux financiers s'écoulant de l'instant 0 à l'année  $n$ , le deuxième terme ( $V(t = 0)$ ) correspond à la valeur actuelle des flux financiers de l'instant 0 à l'infini et le troisième terme correspond à la valeur actualisée à l'année  $n$  des flux financier de l'année  $n$  à l'infini. Cet indicateur est donc surtout utilisé, à défaut de mieux, quand il n'est pas possible d'estimer rigoureusement  $r$ ,  $V(t = 0)$  et  $V(t = n)$  et que l'on peut se contenter des approximations liées à cette méthode.

$$\begin{aligned} \text{VAN2}_{0 \rightarrow n}(t=0) &= \sum_{i=0}^n \frac{R_i - D_i}{(1+r)^i} - V(t=0) + \frac{V(t=n)}{(1+r)^n} \\ &= \text{VAN}_{0 \rightarrow n} - \text{VAN}_{0 \rightarrow \infty} + \text{VAN}_{n \rightarrow \infty} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Dans le cas de la futaie équiennne régénérée par mise à blanc, la valeur initiale et finale de la forêt correspond à la valeur du fonds. L'équation se simplifie donc et l'expression obtenue correspond à celle du BASF (Bénéfice actualisé simple intégrant le fonds) décrit dans certains manuels francophones.

$$\begin{aligned} \text{VAN2}_{0 \rightarrow n}(t=0) &= \sum_{i=0}^n \frac{R_i - D_i}{(1+r)^i} - F + \frac{F}{(1+r)^n} \\ &= \text{VAN}_{0 \rightarrow n}(t=0) + F((1+r)^{-n} - 1) \end{aligned}$$

On note que si  $\text{VAN2} = 0$ , alors on peut isoler  $F$  de l'équation et on retrouve bien l'équation de Faustmann (Equation 3.4).

## 4.4 Valeur actuelle nette à perpétuité

La valeur actuelle nette à perpétuité est également un indicateur de rentabilité pertinent (cf. section 2.6.6). C'est d'ailleurs l'indicateur le plus utilisé et le plus pertinent. Un projet sera qualifié de rentable si  $\text{VAN}_{\infty} > 0$  et plus la valeur de  $\text{VAN}_{\infty}$  est élevée, meilleure est la rentabilité. Cet indicateur permet de comparer des projets d'investissement de durées différentes.

Cet indicateur ne peut néanmoins être calculé que lorsqu'un cycle de production est supposé se répéter à l'infini. Dans certains manuels francophones, il est dénommé le bénéfice actualisé à séquence infinie (BASI).

Le calcul de cet indicateur a été illustré pour différents itinéraires sylvicoles au chapitre 3.

## 4.5 Rapport bénéfice-coût

Le rapport bénéfice-coût<sup>1</sup> correspond à la valeur actualisée des revenus par euro investi. Ce critère a surtout pour utilité de com-

---

1. Benefit cost ratio

TABLE 4.1 – Illustration du calcul et de l'intérêt du rapport bénéfice-coût pour deux projets A et B se distinguant par des dépenses initiales ( $D_0$ ) et des revenus actualisés ( $R_n/(1+r)^n$ ) différents.

Variable	Projet A	Projet B
$D_0$	2000	1000
$R_n/(1+r)^n$	3000	1800
VAN	1000	800
BCR	1.5	1.8

parer des projets avec des investissements (dépenses) différents. Si un projet A demande deux fois plus d'investissements qu'un projet B (Tableau 4.1) mais qu'il ne génère que 1,5 fois plus de bénéfices, on pourrait alors préférer le projet B (bien que sa valeur actuelle nette soit inférieure). Cet indicateur privilégie souvent les projets avec des investissements réduits.

$$\text{BCR} = \frac{\sum_i R_i / (1+r)^i}{\sum_i D_i / (1+r)^i} \quad (4.2)$$

## 4.6 Retour sur investissement

Le retour sur investissement<sup>2</sup> (ROI) est le rapport entre les gains nets actualisés et les investissements actualisés (Equation 4.3) généralement exprimé en pourcentage. Sa signification est très proche de celle du rapport bénéfice-coût. Par exemple, si un projet demande 100 000 € d'investissement et rapporte 150 000 € de bénéfice, alors le ROI =  $(150000 - 100000) / 100000 = 0,5 = 50\%$ . Ce retour sur investissement correspond alors à un rapport bénéfice-coût de 1,5 € par euro investi.

Bien souvent, des investissements sont réalisés surtout pendant les premières années d'un projet et les recettes sont perçues plus tardivement. Le ROI peut être calculé afin de déterminer à partir combien de temps le projet devient rentable ( $\text{ROI} > 0$ ), c'est-à-dire le temps de retour sur investissement. Le calcul du ROI est alors répété pour différentes périodes de temps.

$$\text{ROI} = \frac{\sum_i (R_i - D_i) / (1+r)^i}{\sum_i D_i / (1+r)^i} \quad (4.3)$$

---

2. Return on investment

## 4.7 Taux interne de rentabilité

Le taux interne de rentabilité (TIR)<sup>3</sup> est le taux d'actualisation qui permet d'obtenir une valeur actuelle nette nulle (Equation 4.4).

$$\text{VAN}_{0 \rightarrow n}(t = 0) = 0 = \sum_{i=0}^n \frac{R_i - D_i}{(1 + \text{TIR})^i} \quad (4.4)$$

Le taux interne de rentabilité ne peut pas être calculé de façon analytique puisque l'équation 4.4 est une équation à plusieurs degrés et qu'il n'est pas possible d'isoler TIR. Il conviendra d'utiliser un algorithme pour trouver une solution par approximations successives AFI (2020).

Le taux interne de rentabilité est généralement exprimé en pourcentage et il indique le rendement financier du projet d'investissement. Moyennant certaines précautions, qui seront présentées ultérieurement, le taux interne de rentabilité peut être comparé aux taux de placements bancaires.

Le taux interne de rentabilité peut être calculé, en première approche, sans tenir compte du coût d'immobilisation des capitaux initiaux en imposant que  $\text{VAN}_n = \text{BAS} = 0$ . On y fera référence dans le texte qui suit avec l'acronyme suivant : TIR. Le taux interne de rentabilité peut aussi être calculé en tenant compte du coût d'immobilisation des capitaux initiaux en imposant que  $\text{VAN2}_n = \text{BAS2} = 0$ . On y fera référence dans le texte qui suit avec l'acronyme TIR2. Cette deuxième approche est plus rigoureuse car sans les capitaux initiaux, le projet ne pourrait simplement pas être mené. Il apparaît donc préférable de toujours intégrer le coût d'immobilisation des capitaux.

Reprenons l'échéancier décrit dans le tableau 2.1 pour illustrer le calcul du TIR. Avec  $r = 2\%$ ,  $\text{VAN}_n = 6182,15 \text{ €}$  (Tableau 4.2). Si on augmente la valeur de  $r$ , la valeur de  $\text{VAN}_n$  diminue jusqu'à atteindre une valeur nulle si  $r = 3,704\%$  (Figure 4.1). La valeur ainsi obtenue pour  $r$ , c'est-à-dire la valeur de  $r$  tel que  $\text{VAN}_n = 0$  correspond au TIR.

Pour tenir compte du coût d'immobilisation des capitaux initiaux, il convient d'ajouter une dépense initiale et une recette finale (section 4.3) correspondant respectivement à la valeur initiale et finale de la forêt qui, dans ce cas-ci (futaie équienne régénérée par mise à blanc), correspond à la valeur du fonds (section 3.3). En

---

3. IRR, Internal rate of return.

fixant la valeur du fonds à 2500 €/ha, la valeur de TIR2 obtenue est de 2,949 % (Figure 4.1a).

Cet exemple permet de souligner certains liens existant entre les différents indicateurs : si les valeurs initiale et finale de la forêt sont calculées pour un taux d'actualisation de  $x$  % avec l'équation 3.4 ou 3.3, alors  $VAN2 = 0$  et  $TIR2 = x$  %. Le calcul de TIR2 permet donc aussi d'estimer le taux d'actualisation pour un scénario sylvicole donné.

Le taux interne de rentabilité est un indicateur très utilisé dans le monde financier. Il est néanmoins rarement suffisant pour évaluer des projets forestiers. Son utilisation peut notamment mener à privilégier des investissements avec un retour sur investissement rapide car le TIR maximal correspond à celui qui pénalise le plus les flux financiers les plus distants dans le temps.

Cet indicateur n'est pertinent que si il est calculé pour un projet d'investissement cohérent caractérisé par un investissement initial, des dépenses supplémentaires éventuelles (surtout les premières années) et des recettes qui sont perçues plus tardivement. Son application à des cas particulier (ex. sans dépense initiale) peut mener à des valeurs irréalistes qui n'ont pas de sens et ne peuvent pas être comparées (ex. pour identifier un itinéraire de gestion préférable).

Enfin, le calcul du TIR demande de résoudre une équation à plusieurs degrés à l'aide de processus itératifs. Dans certains cas (ex. si l'échéancier est particulier avec des recettes importantes perçues à différents moments), plusieurs solutions peuvent être possibles. Etant donné ces limitations, le TIR doit être utilisé en connaissance de cause ou comme le conseille Price (1989), il conviendrait d'utiliser de préférence d'autres indicateurs : "Economists are often accused of being equivocal in their recommendations. Here is an exception. This particular economist's advice about to judge a forest investment by its IRR is : DON'T!" (Price, 1989, page 111).

## 4.8 Annuité

Une annuité est un montant constant qui est reçu annuellement. Exprimer la rentabilité d'un projet sous la forme d'une annuité permet parfois d'obtenir une grandeur plus facile à interpréter. Le montant obtenu correspond à un montant fictif qui serait perçu annuellement et qui serait équivalent à l'ensemble des flux financiers considérés (Möhring and Rüping, 2008).

TABLE 4.2 – Calcul du taux interne de rentabilité pour un échéancier donné. Les flux financiers nets (recettes – dépenses) sont actualisés avec un taux d'actualisation de 2 % et de 3,704 %. La valeur actuelle nette ( $VAN_n$ ) du scénario correspond à la somme des flux nets actualisés. Elle est nulle si  $r = 3,704$  %. Le taux interne de rentabilité de ce scénario est donc de 3,704 % sans tenir compte de l'immobilisation du fonds et de 2,840% en tenant compte du coût d'immobilisation du fonds supposé égale à 3000 €.

<b>An</b>	<b>Opération</b>	<b>Net</b>	<b>Net act. (<math>r = 2,0\%</math>)</b>	<b>Net act. (<math>r = 3,7\%</math>)</b>
0	Plantation	-2800	-2800,00	-2800,00
1	Dégagement	-450	-441,18	-433,93
2	Dégagement	-450	-432,53	-418,43
17	Elagage	-1900	-1356,91	-1023,83
22	Eclaircie	371,51	240,31	166,90
28	Eclaircie	326,68	187,64	117,99
34	Eclaircie	835,21	425,98	242,52
40	Eclaircie	1383,42	626,54	322,95
46	Eclaircie	2068,79	831,97	388,26
52	Eclaircie	2305,14	823,17	347,80
58	Coupe finale	25472,32	8077,16	3089,77
		<b><math>VAN_n</math></b>	<b>6182,15</b>	<b>0,00</b>

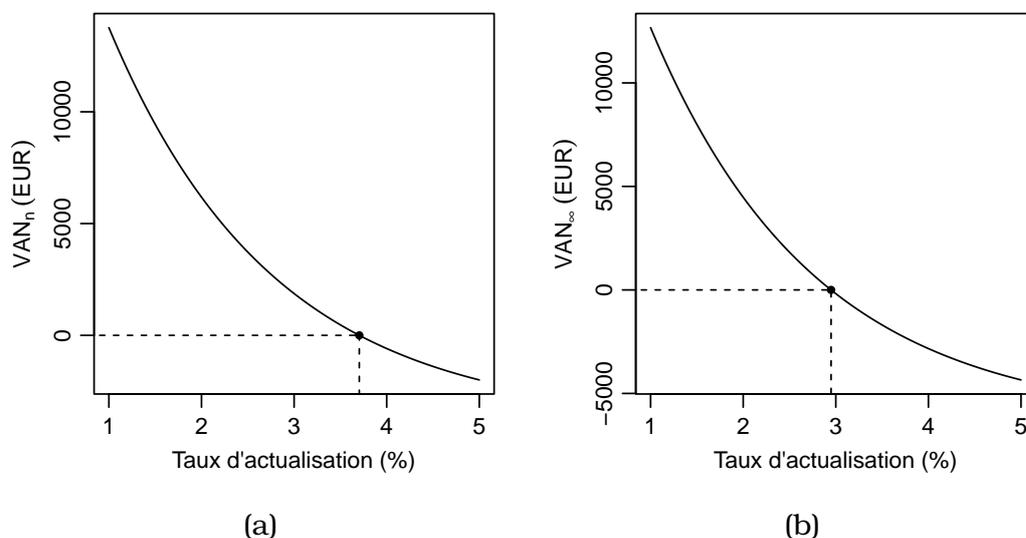


FIGURE 4.1 – Calcul du taux interne de rentabilité (TIR en a et TIR2 en b) pour le scénario décrit avec l'échéancier présenté dans le tableau 4.2.

Soit un échéancier de flux financiers étalés sur  $n$  années. L'annuité équivalente à l'ensemble des flux est :

$$A = VAN_n \cdot \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \cdot r = VAN_\infty \cdot r \quad (4.5)$$

Pour un taux d'actualisation  $r$ , il est donc équivalent de recevoir  $A \text{ €}$  à partir de l'année 1 et pendant une infinité d'années que de recevoir  $VAN_\infty$ .

La méthode a également été adaptée pour évaluer la rentabilité de peuplements, notamment irréguliers, en tenant compte d'une éventuelle variation du capital des arbres sur pied (Möhring and Rüping, 2008; Hanewinkel et al., 2014).

Soit une période de  $n$  années débutant l'année  $x$ , alors l'annuité équivalente pour cette période est :

$$a_{x \rightarrow x+n} = \left( \frac{VM_{x+n}}{(1+r)^n} + \sum_{i=x}^{x+n} \frac{R_i - D_i}{(1+r)^{i-x}} - VM_x \right) \cdot \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \cdot r \quad (4.6)$$

où  $VM_x$  et  $VM_{x+n}$  correspondent à la valeur marchande du peuplement au début et à la fin de la période. L'annuité peut ainsi être calculée pour chaque cycle de coupe. Le résultat est néanmoins

très sensible au choix de l'année initiale et finale. Si la période ne contient qu'une seule coupe, des résultats très différents sont obtenus si la coupe a lieu au début ou à la fin de la période. Par convention, les recettes des éclaircies/coupes sont imputées à la dernière année de chaque période (Hanewinkel et al., 2014). Il est ainsi possible d'obtenir une estimation de l'annuité pour chaque cycle de coupe et donc d'étudier l'évolution de la rentabilité dans le temps. Hanewinkel et al. (2014) ont montré que l'indicateur ainsi obtenu permet d'identifier des peuplements de productivité différente et d'étudier l'effet de la gestion sur la rentabilité.

Pour étudier l'évolution de la rentabilité dans le temps, Hanewinkel et al. (2014) proposent d'appliquer cette formule de trois façons. Soit  $p$  périodes et coupes différentes, alors  $p$  valeurs d'annuité peuvent être obtenues (ex. Figure 4.2) :

1. Chaque valeur d'annuité est calculée en intégrant uniquement les dépenses et les recettes étalées entre deux coupes.
2. Les valeurs d'annuité sont calculées en englobant toutes les recettes et dépenses de l'année initiale jusqu'à l'année considérée.
3. Les valeurs d'annuité sont calculées en englobant toutes les recettes et dépenses de l'année finale à rebours jusqu'à l'année considérée.

La première méthode mène à des résultats très variables entre chaque période alors que des tendances plus claires (ex. augmentation de l'annuité au cours du temps) peuvent être obtenues avec les autres méthodes. Cependant, la deuxième méthode est très sensible à la valeur marchande initiale du peuplement. L'effet d'opérations de gestion effectuées lors des derniers cycles de coupe peut ne pas être perceptible avec cette méthode si la valeur marchande initiale est élevée. A l'inverse, la dernière méthode est très sensible à la valeur marchande finale et peut ne pas permettre d'identifier l'effet d'opérations de gestion effectuées pendant les premiers cycles de coupe. Hanewinkel et al. (2014) concluent que le calcul des trois approches est complémentaire pour interpréter finement les résultats. Ils conseillent néanmoins de privilégier le calcul de l'annuité avec la première approche et de reporter la moyenne et l'écart-type des valeurs obtenues.

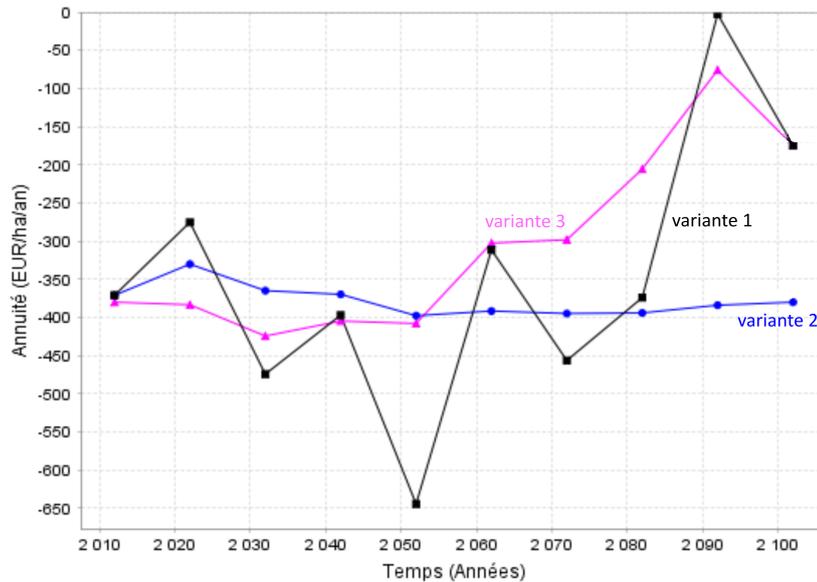


FIGURE 4.2 – Evolution de l’annuité au cours du temps et des différents cycles de coupes. Le choix de la méthode de calcul mène manifestement à des résultats différents. Le graphique illustre l’évolution de l’annuité (variante 1) pour un peuplement régulier simulé en suivant l’échéancier du tableau 2.1. Le graphique a été obtenu en effectuant une simulation de 100 ans pour un peuplement irrégulier avec une rotation de 10 ans. Les résultats pour les trois variantes de l’annuité sont illustrés. On note que pour le premier intervalle les calculs avec les variantes 1 et 2 mènent bien au même résultat. Pour le dernier intervalle, ce sont les calculs des variantes 1 et 3 qui mènent au même résultat. A l’exception des deux dernières rotations, l’annuité est négative pour la majorité des rotations. La gestion simulée (de manière trop arbitraire) ne semble donc pas très propice d’un point de vue financier et en ne considérant que la période simulée.

## 4.9 Illustrations

### 4.9.1 Calculs des indicateurs

Les différents indicateurs peuvent être calculés à partir de l'échéancier présenté dans le tableau 4.3 (correspondant aussi aux tableaux 2.1 et 4.2). Ces calculs permettent de mettre en évidence les liens existant entre ces différents indicateurs.

Cet investissement d'une durée de 58 ans permet de générer 32 763 € de recettes (RT) correspondant à 565 €/an (RM). Etant donné les investissements, les bénéfices s'élèvent à 27 163 € (BT) ou 468 €/an (BM). Ces différents montants et indicateurs ne tiennent cependant pas compte de l'intervalle de temps qui sépare les différents flux financiers. Si l'on admet que le taux d'actualisation est différent de zéro alors ces grandeurs ont peu de sens pour évaluer la rentabilité de cet investissement (décrit par échéancier contenant les flux financiers théoriques d'un itinéraire sylvicole donné).

En utilisant un taux d'actualisation de 2 %, la valeur actualisée des recettes et bénéfices est respectivement de 11 213 € et de 6182 €. Cette dernière valeur (comme cela avait déjà été mentionné dans la section 3.3.5) correspond à la valeur actuelle nette est de  $VAN_n = 6182 \text{ €/ha}$ . La valeur actuelle nette à perpétuité est de  $VAN_\infty = 9052 \text{ €/ha}$ .

Pour calculer la VAN2, il convient de définir à la fois une valeur de fonds et de taux d'actualisation. Si l'on choisit un taux d'actualisation de 2 % et une valeur de fonds égale à  $VAN_\infty$  alors la valeur de VAN2 est nulle.

Le taux interne de rentabilité calculé en négligeant l'immobilisation du fonds est de  $VAN2 = 3,7 \%$ . Ce résultat revient à dire que si le taux d'actualisation choisi était de 3,7 % alors  $VAN_n$  aurait été nulle. Si le taux d'actualisation avait été supérieur à 3,7 % alors  $VAN_n$  aurait été négative.

Pour le calcul du taux interne de rentabilité tenant compte du coût de l'immobilisation du fonds (TIR2), il convient de définir la valeur du fonds (valeur initiale et finale de la forêt). Si l'on utilise la valeur du fonds calculée ( $VAN_\infty$ ) alors le taux ainsi calculé sera égal à 2 % (la valeur du taux d'actualisation utilisée pour calculer  $VAN_\infty$ ).

Enfin, l'annuité qui correspond à l'ensemble des dépenses et recette de l'échéancier et avec  $r = 2 \%$  est de 181,05 €/ha/an.

TABLE 4.3 – Calcul des différents indicateurs de rentabilité à partir d'un échancier avec DA les dépenses actualisées et RA les recettes actualisées.

<b>r</b> 0.02						
<b>An</b>	<b>Dépense</b>	<b>Recette</b>	<b>Net</b>	<b>DA</b>	<b>RA</b>	<b>VAN</b>
0	2800		-2800	2800	0	-2800
1	450		-450	441	0	-441
2	450		-450	433	0	-433
17	1900		-1900	1357	0	-1357
22		372	372	0	240	240
28		327	327	0	188	188
34		835	835	0	426	426
40		1383	1383	0	627	627
46		2069	2069	0	832	832
52		2305	2305	0	823	823
58		25472	25472	0	8077	8077
<b>Total</b>	5600	32763	27163	5031	11213	6182
<b>VAN</b>	6182					
<b>VAN<sub>i</sub></b>	9053					
<b>A</b>	181					
<b>BCR</b>	2.2					
<b>ROI</b>	1.2					

### 4.9.2 Estimation de la révolution optimale

Un problème classique en économie forestière consiste à estimer la révolution optimale pour un peuplement monospécifique et équienne, c'est-à-dire le nombre d'années entre la plantation et la coupe à blanc qui permette de maximiser la rentabilité.

#### Approche théorique

Pour débiter, imaginons un peuplement qui ne serait jamais éclairci avant la mise à blanc. Après la plantation, le volume sur pied augmentera progressivement et cette augmentation au cours du temps suivra théoriquement une relation sigmoïde (Figure 4.3) : l'augmentation du volume sur pied (l'accroissement) augmentera dans le jeune âge du peuplement, jusqu'à atteindre un maximum (au point d'inflexion de l'évolution du volume sur pied) puis décroître au fur et à mesure que le peuplement se densifie et vieillit. Eventuellement, après ce stade, des phénomènes de mortalité pourraient également apparaître et réduire ainsi le volume sur pied.

A partir de cet exemple, on note que si l'on cherche à maximiser le volume annuel récolté (VM), que l'on peut encore appeler l'accrois-

sement moyen (Figure 4.3), alors la longueur de révolution optimale sera égale au nombre d'années pour lequel l'accroissement moyen est égale à l'accroissement courant.

Ce constat est intéressant car l'accroissement courant et moyen peuvent assez facilement être mesurés sur le terrain. Leur mesure pourrait donc indiquer au gestionnaire si le terme d'exploitabilité est proche. Dans les faits, ce critère n'est cependant que peu utilisé car maximiser l'accroissement moyen dans un peuplement non éclairci n'est intéressant que pour certains cas très particuliers. En particulier, le volume récolté ne sera proportionnel aux recettes que si les prix unitaires sont indépendants de la taille des arbres.

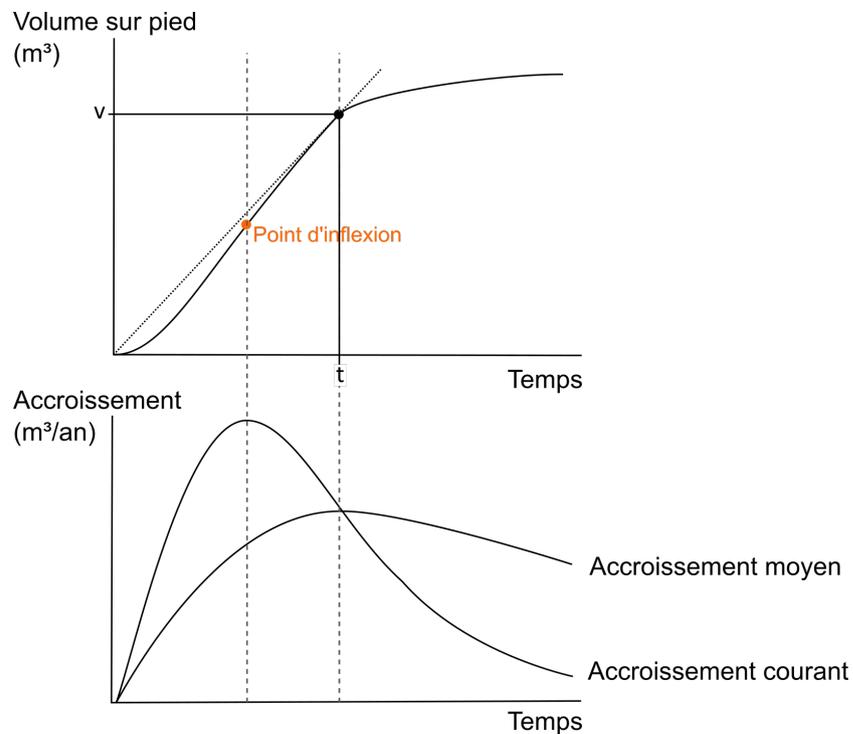


FIGURE 4.3 – Evolution du volume sur pied (graphique du haut), de l'accroissement courant et de l'accroissement moyen en volume (graphique du bas) au cours du temps pour une plantation jamais éclaircie. L'accroissement moyen à une année  $t$ , ou encore le volume annuel récolté (VM), correspond à la pente de la droite passant par l'origine et par le point  $(t, v)$  dans le graphique du haut. A ce point, la pente de cette droite passant par l'origine est égale à la dérivée de la courbe qui correspond aussi l'accroissement courant.

### Approche par simulation

Imaginons maintenant le cas d'une plantation équienne d'épicéa dont l'évolution des caractéristiques (volume sur pied, taille des arbres) a été calculée avec un simulateur (Ligot et al., 2023). Supposons également que le prix unitaire dépend de la taille des arbres selon la relation illustrée dans la figure 4.4. Supposons, en outre, que les dépenses relatives à l'installation de la plantation sont celles décrites dans le tableau 4.4.

Si l'on regarde les indicateurs calculés à partir des volumes récoltés (Figure 4.5a et 4.5b), on remarque que le volume annuel moyen est maximal pour une révolution d'environ 50 ans et que le volume total n'a pas atteint de valeur maximale lors de la simulation de 100 ans. L'examen des recettes, qui dépendent de la courbe de prix, mène à des résultats légèrement différents (Figure 4.5c et 4.5d). Pour maximiser les recettes annuelles moyennes, il conviendrait de repousser davantage le terme d'exploitabilité et d'utiliser une longueur de révolution d'environ 85 ans. Maximiser les recettes totales demande en outre une révolution de plus de 100 ans. Ces critères ignorent le coût d'immobilisation des capitaux.

Trois indicateurs de rentabilité ( $VAN_n$ ,  $VAN_\infty$ , TIR2) ont été calculés (Figure 4.6).  $VAN_n$  et  $VAN_\infty$  ont été calculés en utilisant un taux d'actualisation de 2 %. Le TIR2 a quant à lui été calculé en fixant la valeur du fonds à 3000 €. On note que la révolution optimale est différente en fonction de l'indicateur utilisé (Figure 4.6).

Bien que la  $VAN_n$  ait été estimée, ici surtout à des fins d'illustration, cet indicateur ne permet pas de comparer des projets de durées différentes. Il est donc peu pertinent d'utiliser cet indicateur pour identifier une révolution optimale.

La révolution optimale la plus courte trouvée est celle obtenue si on utilise le taux interne de rentabilité. Un taux interne de rentabilité de 2,9 % est obtenu si la longueur de révolution est de 57 ans. Un résultat assez proche aurait été obtenu avec la  $VAN_\infty$  en utilisant un taux d'actualisation de 2,9 % plutôt qu'un taux de 2 %.

Avec un taux d'actualisation de 2%, la  $VAN_\infty$  est maximisée (9806 €) si la révolution est de 65 ans. La valeur de 9806 € correspond aussi à une estimation de la valeur du fonds (pour un taux d'actualisation égal à 2%).

Si l'on considère deux options : une révolution de 57 ans (optimum d'après le TIR2) et de 65 ans (optimum selon le  $VAN_\infty$ ), on peut montrer que le choix entre l'une ou l'autre option dépend autant de

l'indicateur choisi que des hypothèses utilisées pour les calculer. Le calcul de  $VAN_{\infty}$  dépend du taux d'actualisation choisi. On peut montrer que si le taux d'actualisation choisi est inférieur à 2,4 %, c'est la révolution de 65 ans qui sera choisie (Figure 4.7). Si le taux d'actualisation est supérieur à 2,4 % alors, la révolution plus courte sera choisie. De la même manière, le TIR2 dépend de la valeur de fonds choisie. Si le fonds choisi est supérieur à 5770 € alors la révolution de 65 ans sera choisie et inversement si le fonds est inférieur à 5770 €.

TABLE 4.4 – Dépenses relatives à l'installation de la plantation d'une pessière simulée.

Année	Opération	Prix (€/ha)
0	Plantation	2881,25
1	Dégagement	350
2	Dégagement	350
3	Dégagement	350
4	Dégagement	350
18	Elagage	950

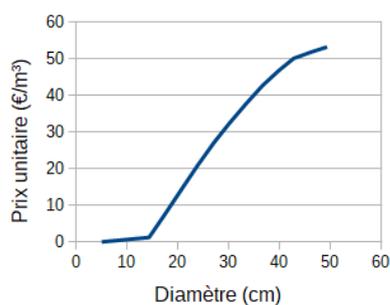


FIGURE 4.4 – Exemple d'évolution du prix unitaire en fonction de la taille des arbres.

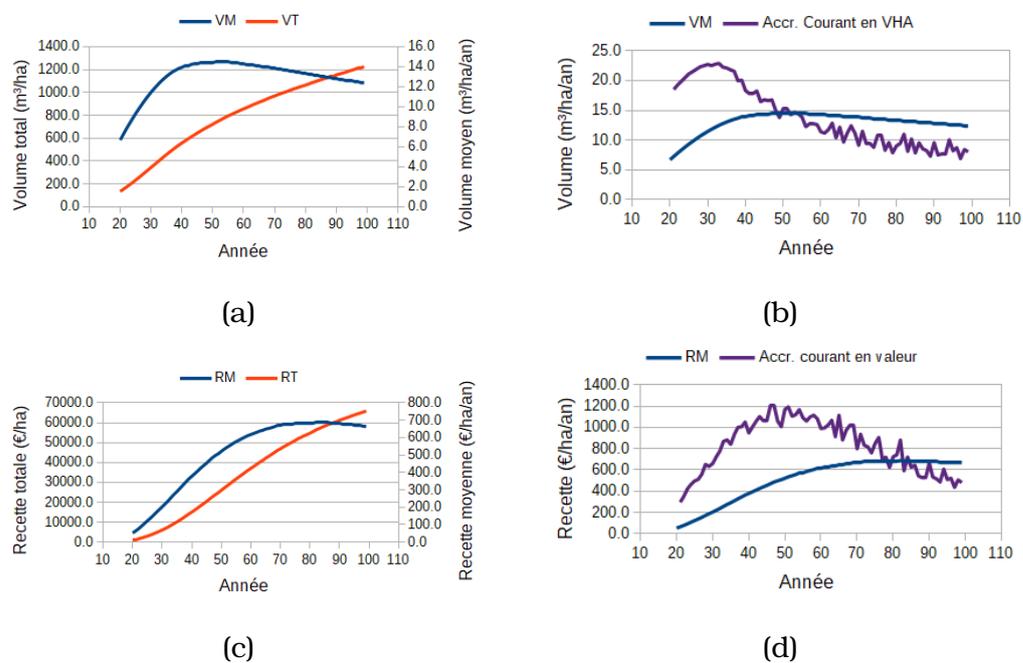


FIGURE 4.5 – Evolution du volume sur pied total et moyen (a), de l'accroissement courant et moyen en volume (b), de la recette totale et moyenne (c) et de l'accroissement courant et moyen des recettes (d).

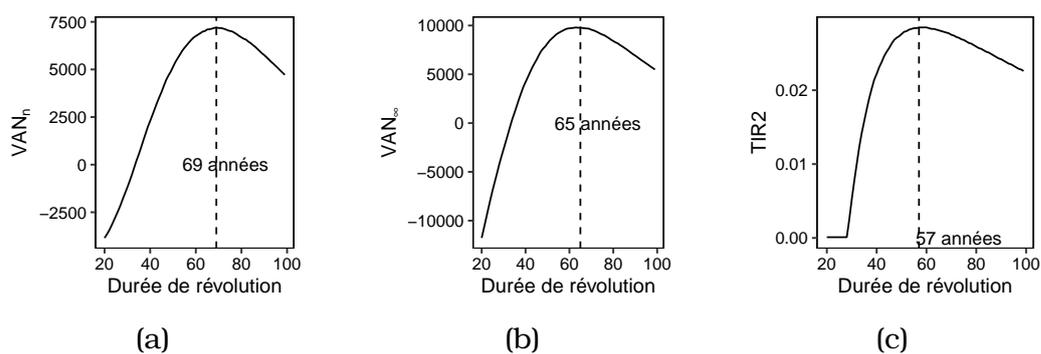


FIGURE 4.6 – Evolution de trois critères de rentabilité en fonction de la longueur de révolution d'une peissière à l'aide de simulations.

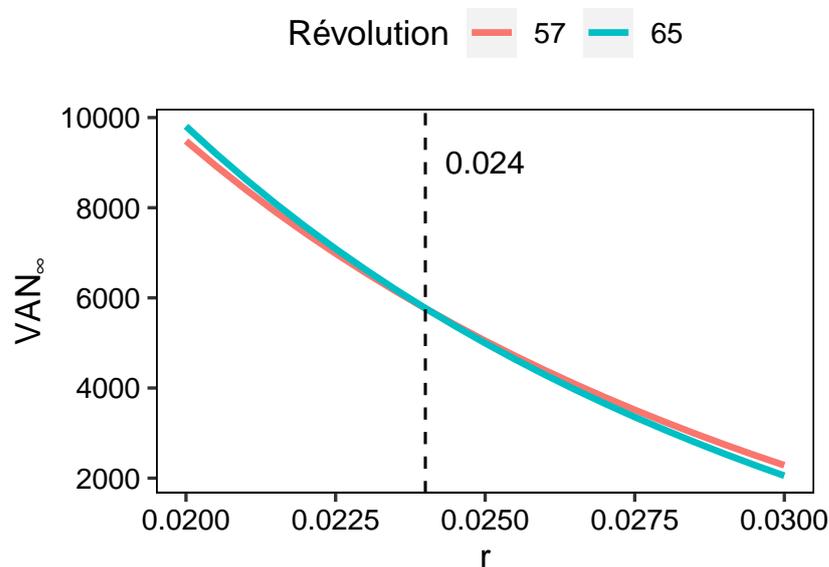


FIGURE 4.7 – Evolution de  $VAN_{\infty}$  (BASI) en fonction du taux d'actualisation ( $r$ ) et pour deux durées de révolution. Si le taux d'actualisation est de 2,4 %, alors la  $VAN_{\infty}$  est de 5770 € et les deux scénarios sont alors aussi rentables l'un que l'autre (ils ont la même  $VAN_{\infty}$ ). Si le taux d'actualisation est inférieur à 2,4 % alors c'est la révolution de 65 ans qui permet d'obtenir la plus grande  $VAN_{\infty}$ . Le graphique peut également être lu dans l'autre sens. Si TIR2 est calculé avec un fonds de 5770 € alors  $TIR2 = 2,4$  %. Si une valeur de fonds supérieure à 5770 € est choisie alors c'est la révolution de 65 ans qui permet d'obtenir le TIR2 le plus élevé.

TABLE 4.5 – Estimation de la longueur de révolution optimale pour la pessière simulée.

Type de critère	Critère	Paramètre	Révolution
Accumulation	VT		>100
	RT		>100
Productivité	VM		50
	RM		85
Rentabilité	$VAN_n$	$r = 2$ %	69
	$VAN_{\infty}$	$r = 2$ %	65
	TIR2	Fonds = 3000 euro	57

## 4.10 Résumé

Il existe de nombreux indicateurs de rentabilité. Ils permettent de synthétiser la complexité d'un itinéraire de gestion (caractérisé par un échéancier) en une valeur qui peut alors aisément être utilisée pour comparer des scénarios différents. Il conviendra néanmoins de se rappeler que tous ces indicateurs ont des avantages et des inconvénients (Figure 4.8). Notamment :

- certains indicateurs tiennent compte des recettes mais pas des coûts (VT, VM, RT, RM) ;
- certains indicateurs ne tiennent pas compte de la durée du projet (VT, RT, BT) ;
- certains indicateurs ne tiennent pas compte du coût de l'immobilisation des capitaux (VT, VM, RT, RM, BT, BM). ;
- la valeur actuelle nette ( $VAN_{0 \rightarrow n}$ ) ne peut pas être utilisée pour évaluer la rentabilité de projets différents.
- la valeur actuelle nette ( $VAN_{0 \rightarrow n}$ ) ne tient pas compte du coût de l'immobilisation du capital initial.
- le calcul du TIR ou de TIR2 ne repose pas sur une solution analytique et son interprétation est délicate et parfois fallacieuse.

La valeur actuelle nette à perpétuité ( $VAN_{\infty}$ ) est l'indicateur le plus complet qu'il convient généralement de privilégier mais il sera souvent bénéfique de calculer plusieurs indicateurs.

## 4.11 Exercices

### 4.11.1 Exercice 1

Soit une pessière régulière d'un hectare dont les flux financiers ont été calculés pour une révolution complète (Tableau 4.6).

1. Calculez le taux interne de rentabilité en utilisant une valeur de fonds égale à 3500 €/ha.
2. Calculez la valeur actuelle nette (ou le bénéfice actualisé simple) pour un taux d'actualisation de 3 % et de 4 %.
3. Justifiez pourquoi il est important de tenir compte de la valeur du fonds pour calculer le taux interne de rentabilité.

Type de critère	Volume Revenus		Bénéfice sur x révolutions		
			X=1	1 ≤ x ≤ ∞	x → ∞
Accumulation	VT	RT		BT	
Utilisation possible dans le cadre des fonctions écologiques et sociales					
Productivité	VM	RM		BM	
Le coût de l'immobilisation des capitaux n'est pas pris en considération					
Rentabilité partielle			BAS		
Fonds négligeable					
Rentabilité globale			BASF	TIR	BASI
			Valeur exogène du fonds	Valeur indicatrice seulement	Valeur endogène du fonds, cohérence économique et temporelle

FIGURE 4.8 – Caractéristiques des principaux indicateurs de rentabilité.

TABLE 4.6 – Echancier de l'exercice 1.

Année	Opération sylvicole	Flux (€/ha)
0	Préparation du sol/plantation	-2700
1	Dégagement	-900
2	Dégagement	-900
19	Elagage de pénétration	-1900
20	Eclaircie	-100
25	Eclaircie	0
26	Elagage 2*6m	-900
30	Eclaircie	500
35	Eclaircie	700
40	Eclaircie	1400
45	Eclaircie	1700
50	Mise à blanc	28000

### 4.11.2 Exercice 2

Comparez différents itinéraires de gestion pour un peuplement de douglas de productivité 2 en utilisant la table de production correspondante (Figure 4.9).

Vous ferez les hypothèses suivantes :

- le taux d'actualisation est de 4 % ;
- la préparation du terrain coûte 900 €/ha ;
- la plantation coûte 1900 €/ha ;
- les dégagements sont réalisés les deux premières années (années 1 et 2) et coûtent 450 €/ha chacun ;
- l'élagage de pénétration est prévu à 17 ans et coûte 1900 €/ha ;
- les autres frais sont compensés par les revenus de la chasse ;
- les pertes dues à la mortalité naturelle et au gibier amputent les revenus de 20 % durant toute la vie du peuplement ;
- les prix des arbres vendus sur pied sont ceux donnés dans le tableau 4.7.

TABLE 4.7 – Prix de vente unitaire (bois sur pied) des douglas par catégories de circonférence pour l'exercice 2.

<b>Circonférence (cm)</b>	<b>Prix (€/m<sup>3</sup>)</b>
20-39	10
40-59	25
60-69	35
70-89	55
90-119	72
120-149	81
150-179	83
180 +	85

1. Recherchez le terme d'exploitabilité maximisant la valeur actuelle nette à perpétuité ( $VAN_{\infty}$ , BASI) et illustrez votre réponse avec un graphique.
2. Par rapport au scénario 1, calculez l'augmentation moyenne du prix des bois mis à blanc qui serait nécessaire pour compenser le coût d'un élagage en hauteur réalisé à 25 ans pour un montant de 1500 €/ha.
3. Par rapport au scénario 1, et en supposant que la valeur du fonds est de 4000 €/ha, calculez la valeur du taux interne de

Caractéristiques : Essence : douglas      Plantation : 2,5 x 2 (85% de reprise)      Rotation : 6 ans  
 Classe II (36 m à 50 ans)      Cloisonnement : 1 ligne sur 9      Taux d'actualisation : 2 %

Table de production

Age années	Hdom m	Avant prélèvement				Prélèvement				Après prélèvement				Accroissements					h/d	Ecl %	Dist m	
		Nha m <sup>2</sup> /ha	Cg cm	Gha m <sup>2</sup> /ha	Vha m <sup>2</sup> /ha	Nha m <sup>2</sup> /ha	Cg cm	Gha m <sup>2</sup> /ha	Vha m <sup>2</sup> /ha	Nha m <sup>2</sup> /ha	Cg cm	Gha m <sup>2</sup> /ha	Vha m <sup>2</sup> /ha	ACC cm <sup>3</sup> /ha/an	ACG m <sup>3</sup> /ha/an	AMG m <sup>3</sup> /ha/an	ACV m <sup>3</sup> /ha/an	AMV m <sup>3</sup> /ha/an				PTV m <sup>3</sup> /ha
17	13.5	1613	46	26.8	150	527	44	8.2	45	1086	46	18.6	104	2.5	2.27	1.57	22.8	8.8	150	92	32.6	3.3
23	18.1	1082	61	32.2	241	355	53	7.9	57	727	65	24.3	185	2.5	2.04	1.76	24.5	12.5	287	88	32.8	4.0
29	22.4	724	80	36.5	332	203	68	7.5	66	520	84	29.0	265	2.5	1.84	1.81	25.3	15.0	434	84	28.1	4.7
35	26.5	518	99	40.0	417	139	85	8.0	82	379	103	32.1	336	2.5	1.66	1.82	25.2	16.7	586	81	26.8	5.5
41	30.3	378	118	42.0	487	93	104	8.0	91	285	123	34.1	396	2.6	1.50	1.80	24.7	18.0	737	78	24.6	6.4
47	33.7	284	138	43.1	544	61	122	7.2	91	223	142	35.9	453	2.6	1.37	1.76	24.1	18.8	885	75	21.4	7.2
53	37.0	223	158	44.1	597	42	141	6.6	89	181	161	37.5	508	2.6	1.27	1.71	23.4	19.4	1030	72	18.8	8.0
59	39.9	180	177	45.1	649	30	160	6.1	88	150	181	39.0	561	2.6	1.18	1.67	22.8	19.8	1170	69	16.7	8.8
65	42.7	150	196	46.1	698	22	180	5.7	87	128	199	40.3	611	2.6	1.10	1.62	22.2	20.1	1307	67	14.7	9.5
71	45.3	128	215	46.9	745	18	195	5.3	85	111	218	41.6	660	2.6	1.03	1.58	21.7	20.3	1441	65	13.7	10.2
77	47.7	111	233	47.8	790	14	216	5.0	84	97	235	42.8	706	2.6	0.98	1.54	21.2	20.4	1571	64	12.2	10.9
83	49.9	97	251	48.7	833	97	251	48.7	833	-	-	-	-	-	-	1.50	-	20.5	1 698	62	-	-

Distribution des volumes produits par classe de grosseur

Age années	Hdom m	Classes de grosseur - Volume sur pied								VMV		Classes de grosseur - Volume prélevés								VMP		VMA € /ha	totale € /ha
		20-40 m <sup>2</sup> /ha	40-60 m <sup>2</sup> /ha	60-70 m <sup>2</sup> /ha	70-90 m <sup>2</sup> /ha	90-120 m <sup>2</sup> /ha	120-150 m <sup>2</sup> /ha	150-180 m <sup>2</sup> /ha	180+ m <sup>2</sup> /ha	VMV € /ha	VMA € /ha	20-40 m <sup>2</sup> /ha	40-60 m <sup>2</sup> /ha	60-70 m <sup>2</sup> /ha	70-90 m <sup>2</sup> /ha	90-120 m <sup>2</sup> /ha	120-150 m <sup>2</sup> /ha	150-180 m <sup>2</sup> /ha	180+ m <sup>2</sup> /ha	VMP € /ha	VMA € /ha		
17	13.5	29	89	27	5	0	0	0	0	2 211	1 579	10	26	8	2	0	0	0	0	591	422	1 579	
23	18.1	8	71	56	89	17	0	0	0	6 914	4 385	5	26	10	13	2	0	0	0	1 151	730	4 807	
29	22.4	1	26	37	124	143	0	0	0	13 867	7 809	1	14	14	19	18	0	0	0	2 064	1 162	8 960	
35	26.5	0	7	14	75	220	102	0	0	21 719	10 860	0	5	8	25	31	12	0	0	3 388	1 694	13 174	
41	30.3	0	1	3	26	180	227	49	0	29 344	13 029	0	1	2	14	43	23	7	0	4 543	2 017	17 037	
47	33.7	0	0	0	6	76	257	198	6	36 912	14 553	0	0	0	4	31	35	19	0	5 098	2 010	20 579	
53	37.0	0	0	0	1	21	165	288	122	44 590	15 611	0	0	0	1	12	42	25	9	5 533	1 937	23 646	
59	39.9	0	0	0	0	3	54	276	315	51 842	16 117	0	0	0	0	2	24	42	19	5 957	1 852	26 089	
65	42.7	0	0	0	0	0	12	140	545	58 051	16 025	0	0	0	0	5	42	39	6 270	1 731	27 849		
71	45.3	0	0	0	0	0	2	38	704	63 057	15 457	0	0	0	0	2	18	64	6 328	1 551	29 012		
77	47.7	0	0	0	0	0	0	6	783	67 210	14 629	0	0	0	0	0	4	79	6 370	1 387	29 736		
83	49.9	0	0	0	0	0	0	0	833	71 050	13 732	0	0	0	0	0	0	0	833	71 050	13 732	30 225	
Total	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	72	41	78	140	144	157	1043	-	30 225	-	

FIGURE 4.9 – Table de production pour l'exercice 2 (Perin et al., 2016).

rentabilité.

- Vos résultats auraient-ils été différents si le peuplement était de meilleure productivité (ex. classe de productivité 1) ? Argumentez votre avis.

### 4.11.3 Exercice 3

Une pessière de 100 ha destinée à la production de bois est utilisée également à des fins cynégétiques. Après quelques visites de terrain, vous constatez que les peuplements présentent des dégâts dont l'importance est liée à la densité du gibier. Afin de conseiller le propriétaire, vous recherchez la densité de gibier idéale en supposant que :

- le taux de dégâts (proportion des tiges touchées) est proportionnel à la densité de gibier ;
- 3 cervidés aux 100 hectares provoquent un dégât évalué à 15 % des tiges abîmées en permanence ;
- les tiges avec dégâts de gibier sont vendues 40 % moins chères ;
- la location de la chasse évolue selon l'équation : prix (€/ha/an) =  $32 \times \ln(\text{nombre de cervidés pour 100 ha})$  ;

- le fonds est de 2500 €/ha ;
- les coûts sont ceux décrits dans le tableau 4.8 ;
- les volumes et prix des bois sont ceux décrits dans le tableau 4.9.

TABLE 4.8 – Liste des dépenses.

<b>Opération sylvicole</b>	<b>Année</b>	<b>Flux (€/ha)</b>
Plantation/préparation terrain	0	-2800
Dégagement	1	-900
Dégagement	2	-900
Elagage de pénétration	19	-1800
Elagage en hauteur	26	-800

TABLE 4.9 – Volumes et prix unitaires correspondant aux différentes coupes.

<b>Opération sylvicole</b>	<b>Année</b>	<b>Prix (€/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>/ha)</b>
Eclaircie	20	2	57
Eclaircie	25	5	57
Eclaircie	30	10	57
Eclaircie	35	15	58
Eclaircie	40	25	57
Eclaircie	45	40	55
Mise à blanc	50	54	516

#### 4.11.4 Exercice 4

Dans une pessière d'un hectare, on récolte au total 700 m<sup>3</sup>, avec une coupe finale vendue à 60 €/m<sup>3</sup> et réalisée 35 ans après le premier élagage. Cet élagage a été réalisé lorsque le peuplement avait à 15 ans et l'année de cet élagage est considérée comme l'année initiale (instant 0). Les volumes et les revenus de chaque coupe sont détaillés dans le tableau 4.10. Ils correspondent à un premier scénario lors duquel les arbres ne sont pas élagués (scénario de référence).

Trois autres scénarios sont envisagés. Dans chacun de ces scénarios, 250 épicéas sont élagués.

TABLE 4.10 – Volumes et recettes perçus lors de chaque coupe avec le scénario de référence.

Année	0	5	10	35
Prix du bois (€/m <sup>3</sup> )	7	12	23	60
Volume total (m <sup>3</sup> )	50	100	100	450
Revenu total (€)	350	1200	2300	27000

Le premier scénario consiste à élaguer les arbres les années 0 et 5. Les coûts de ces deux interventions sont respectivement de 1,2 €/arbre et 2,4 €/arbre. Ce scénario permet de produire 100 m<sup>3</sup> de bois sans noeuds lors de la coupe finale.

Le deuxième scénario consiste à élaguer les arbres les années 0 et 10. Les coûts de ces deux interventions sont respectivement de 1,2 €/arbre et 3,5 €/arbre. Ce scénario permet de produire 160 m<sup>3</sup> de bois sans noeuds lors de la coupe finale.

Le troisième scénario consiste à élaguer les arbres les années 0, 5 et 10. Les coûts de ces deux interventions sont respectivement de 1,2 €/arbre, 2,4 €/arbre et 3,5 €/arbre. Ce scénario permet de produire 200 m<sup>3</sup> de bois sans noeuds lors de la coupe finale.

En utilisant un taux d'actualisation de 2 % :

1. calculez, pour chacun des 3 scénarios, le prix de vente du bois élagué pour que l'élagage soit justifié ;
2. identifiez le scénario le plus rentable si le prix du bois élagué est de 75 €/m<sup>3</sup>.

#### 4.11.5 Exercice 5

Suite à une mise à blanc, un propriétaire s'intéresse sur l'intérêt d'effectuer une nouvelle plantation. Le scénario de l'itinéraire avec une plantation correspond à celui décrit dans le tableau 4.3. Le scénario basé sur l'utilisation de la régénération naturelle consiste à abandonner la parcelle. Du bouleau s'y installera et le propriétaire estime que la coupe du peuplement, 30 ans plus tard, lui rapportera 2000 €/ha.

1. Calculez différents indicateurs de rentabilité pour ces deux scénarios ;
2. Discutez de la pertinence des différents indicateurs de rentabilité utilisés.

**4.11.6 Exercice 6**

Soit un projet d'exploitation forestière qui permet de générer 1 million d'euros chaque année, de l'année 1 à l'année 10. Après 10 ans, les conséquences de ce projet seront catastrophiques à causes de problèmes d'érosion et d'inondations. Avant d'autoriser l'exploitation, le gouvernement local souhaite vérifier si le projet reste rentable si les coûts des inondations et des problèmes d'érosion estimés à 1000 millions d'euros sont pris en compte.

1. Les conseillers du gouvernement ont évalué le projet en calculant le taux interne de rentabilité et en négligeant la valeur initiale de l'actif. Calculez cette (mauvaise) estimation.
2. Discutez de la valeur obtenue en vue de conseiller le gouvernement local. Pourquoi est-il fallacieux d'utiliser cet indicateur?



## Chapitre 5

# Choix du taux d'actualisation et interprétation du taux interne de rentabilité

We are interested in  
tomorrow's satisfaction as  
such, not in today's  
assessment of tomorrows  
satisfaction.

---

(Sen, 1957, page 746)

Le choix du taux d'actualisation n'est pas anodin. Il a des répercussions très importantes sur le résultat de l'actualisation. Compte tenu de la durée des investissements forestiers, une modification de quelques dixièmes de pour cents peut affecter radicalement la valorisation de flux financiers distants dans le temps et les décisions qui en découlent. En outre, ce choix fait l'objet de débats toujours non résolus et sa compréhension est essentielle pour interpréter certains indicateurs de rentabilité dont le taux interne de rentabilité (section 4.7). Il paraît donc important de s'appesantir sur ce paramètre. Le sujet étant cependant vaste nous n'aborderons ici que quelques éléments clefs de compréhension et en lien direct avec l'évaluation de projets forestiers.

## 5.1 Définition

Le taux d'actualisation,  $r$ , est le taux qui permet d'actualiser des flux financiers (cf. section 2.6.3), c'est-à-dire calculer leur valeur pour une année de référence (souvent l'année actuelle ou l'instant 0).

Pour rappel, la valeur actuelle ( $V_{(t=0)}$ ) d'un flux financier  $V_{(t=n)}$  perçu dans  $n$  années (dans le futur donc) est égale à :

$$V_{(t=0)} = \frac{V_{(t=n)}}{(1+r)^n}$$

L'équation peut également être inversée pour calculer la valeur actuelle d'un flux financier passé (Equation 2.4).

Ces équations permettent de définir le taux d'actualisation pour des périodes d'actualisation discontinues. Pour des périodes d'actualisation continues, les équations et la définition du taux d'actualisation sont légèrement différentes (section 2.6.3).

## 5.2 Justification

Le choix du taux d'actualisation doit refléter l'importance que porte un agent économique pour des flux financiers proches par rapport à des flux financiers plus distants dans le temps. Dit de manière plus succincte, le taux d'actualisation reflète la préférence pour le présent. Plus cette préférence est forte plus le taux d'actualisation est élevé. A l'inverse, un acteur qui n'a pas de préférence pour un revenu perçu immédiatement ou à quel que moment que ce soit dans le futur utilise un taux d'actualisation de zéro.

Plusieurs éléments peuvent expliquer l'utilisation de différents taux d'actualisation (généralement positif). D'après le modèle de Ramsey, pour un bien de consommation, le taux d'actualisation dépend de la préférence pour le présent, d'un effet de richesse et d'un effet de précaution :

$$r = \delta + \gamma g - 0.5\gamma^2\sigma^2 \tag{5.1}$$

où

- $\delta$  est la préférence pure pour le présent ;
- $\gamma g$  traduit l'effet de richesse calculé à partir de l'utilité marginale des biens futurs ( $\gamma$ ) et de la croissance économique ( $g$ ) ;

- $0.5\gamma^2\sigma^2$  traduit l'effet de précaution qui dépend des incertitudes économiques où  $\sigma^2$  est la variance de la croissance économique.

Ce modèle applicable pour des biens de consommation doit néanmoins être revu ou critiqué pour les biens et services environnementaux. En outre, le taux d'actualisation est parfois corrigé pour tenir compte de risques ou du coût d'opportunité du capital. Ces différentes notions sont abordées brièvement dans les sections qui suivent.

Notons également que  $r$  ne dépend pas du taux d'inflation. Cette notion sera rediscutée plus loin (section 5.3).

### 5.2.1 Préférence pure pour le présent

La plupart des acteurs économiques préfèrent recevoir un euro aujourd'hui qu'un euro dans une ou plusieurs années. Cette préférence n'est pas liée à l'inflation mais résulte d'une impatience à consommer dont l'origine peut être multiple (ex. risque de ne pas pouvoir en profiter plus tard). Cette préférence pour le présent justifie d'utiliser un taux d'actualisation positif.

Ce terme est parfois estimé en observant comment les jeunes ménages acceptent de sacrifier leur consommation courante en épargnant pour augmenter leur consommation future. La valeur obtenue est alors proche de 4 % (Gosselin et al., 2011).

Cette préférence peut cependant être très variable entre agents économiques et notamment entre des agents privés et publics. Selon certains, cette composante ne devrait pas être prise en compte pour l'évaluation de projet public car il ne serait pas éthique de privilégier la génération actuelle aux dépens des générations futures.

#### Illustration

Des étudiants ont été interrogés en 2021 et 2022 pour déterminer leur préférence pour le présent et le taux d'actualisation correspondant. Il leur était demandé d'évaluer le montant minimal qu'ils souhaitaient recevoir dans un ou dix ans pour consentir à un investissement de 1000 €. En moyenne, les étudiants ont indiqué qu'ils souhaitaient recevoir au moins 1228 € dans un an pour consentir à l'investissement ou 4974 € dans dix ans (Tableau 5.1). Néanmoins, la variabilité entre les réponses était substantielle. En écartant les réponses les plus extrêmes qui correspondaient, sans doute, à des cas

TABLE 5.1 – Statistiques des réponses aux sondages demandant à des étudiants quel était le montant qu'ils souhaitaient recevoir dans 1 ou 10 ans pour consentir à un investissement initial de 1000 €.

Statistique	Durée = 1 an		Durée = 10 ans	
	Montant	r (%)	Montant	r (%)
Quantile 25%	1080	8.0	1800	6.0
Médiane	1100	10.0	2500	9.6
Quantile 75%	1200	20.0	10000	25.9

particuliers (ex. refus d'investir) le taux d'actualisation correspondant variait entre 8 % et 20 %, soit une préférence pour le présent très marquée. Cet exemple suggère que :

- Le taux d'actualisation peut varier d'une personne à une autre même pour des personnes appartenant à un groupe assez homogène (promotion d'étudiants) ;
- Le taux d'actualisation peut dépendre de la durée de l'investissement ;
- Le taux d'actualisation peut dépendre de la conjoncture économique (différence entre le sondage de 2021 et 2022) et d'autres éléments que la préférence pure pour le présent ont peut-être été inconsciemment pris en compte par les étudiants de cet exemple.

### 5.2.2 Effet de richesse

En faisant l'hypothèse que les générations futures seront plus riches, disposeront de davantage de biens et d'avancées technologiques (croissance économique), l'utilité d'un bien serait plus faible pour les générations futures que pour la génération présente. L'utilité marginale, c'est-à-dire le consentement à payer pour obtenir une unité supplémentaire de ce bien, serait donc décroissante avec le temps. Sous cette hypothèse, il est donc justifié d'utiliser un taux d'actualisation positif même si la préférence pour le présent est nulle.

### 5.2.3 Effet de précaution

La croissance économique étant incertaine, il paraît rationnel qu'un agent économique mette de côté une partie de son capital par précaution et pour pallier à des difficultés futures. Au contraire de la préférence pour le présent et de l'effet de richesse, l'effet de précaution justifie de réduire la valeur du taux d'actualisation. L'effet de précaution peut inciter par exemple les forestiers à préserver la diversité de leurs forêts malgré le coût que cela engendre afin de faire face aux changements climatiques (Gosselin et al., 2011).

### 5.2.4 Particularités des biens et services environnementaux

Les éléments précédents ont été présentés pour des biens de consommation. Pour des biens et services environnementaux, les raisonnements peuvent être légèrement différents justifiant ainsi l'utilisation d'un taux d'actualisation distinct, un taux d'actualisation écologique applicable aux biens et services environnementaux.

**Effet de richesse** Contrairement aux biens de consommation, les biens et services environnementaux ne seront pas nécessairement produits en plus grandes quantités, même dans un contexte de croissance économique. Étant donné la croissance démographique, les dégradations environnementales, certaines ressources environnementales pourraient décroître et leur valeur pourrait augmenter dans le futur. L'utilité marginale des ressources environnementales ( $\gamma$ ) pourrait donc s'accroître. Notamment, pour les biens et services environnementaux qui seront de moins en moins disponibles à l'avenir (ex. bénéfices écologique associés aux très gros arbres), la part relative à l'effet de richesse dans le taux d'actualisation ( $\gamma g$  dans l'équation 5.1) pourrait alors devenir négative.

**Prudence écologique** Comme l'effet de précaution, l'effet de prudence écologique encourage à utiliser un taux d'actualisation faible. Néanmoins, étant donné que les incertitudes sur l'évolution de l'environnement peuvent être encore plus importantes que celles sur l'évolution de la croissance économique, la prudence écologique suggère de réduire encore davantage le taux d'actualisation. Pour les

investissements forestiers, étant donné que leur échéance est souvent très distante dans le temps, les incertitudes sont souvent substantielles menant à un effet de prudence écologique (ou de précaution) potentiellement de plus en plus important étant donné les changements climatiques et ses conséquences.

### **Substitution et corrélation avec les biens de consommation**

Le taux d'actualisation écologique n'est pas indépendant du taux d'actualisation utilisé pour les biens de consommation. Dans une certaine mesure les biens de consommation et environnementaux peuvent se substituer l'un à l'autre. Un individu pourrait donc être moins sensible à une détérioration de l'environnement s'il peut, en contrepartie, disposer de plus de biens de consommation. Sous cette hypothèse, une diminution de la croissance économique et/ou une augmentation de l'incertitude de la croissance économique tend à réduire le taux d'actualisation écologique.

### **5.2.5 Risques**

Enfin, une autre démarche classiquement utilisée pour tenir compte du risque consiste à ajouter "une prime de risque" au taux d'actualisation. L'idée sous-jacente est qu'un propriétaire accepte plus de risques si le projet est plus rentable (comme pour un produit financier). La notion de risque devrait cependant être dissociée de la notion d'actualisation (préférence pour le présent). En effet, les risques n'augmentent pas toujours au cours du temps. Lorsque les risques augmentent au cours du temps, la tendance est rarement exponentielle et donc rarement correctement prise en compte par la formule de l'actualisation. Certains risques peuvent s'amenuiser dans le temps (ex. réussite d'une plantation), augmenter dans le temps mais pas de façon exponentielle (ex. le risque de chablis peut être nul avant 30-40 ans et devenir très important après) ou mener à des conséquences aussi bien favorables que défavorables (incertitudes économique et politique). En outre, augmenter le taux d'actualisation ne mène pas forcément à pénaliser les investissements risqués (Tableau 5.2).

Pour tenir compte du risque dans l'évaluation d'un projet il convient de comparer la valeur actuelle nette par euro investi pour un projet risqué et un projet sans risques. Le calcul de la valeur actuelle nette peut également être adapté pour tenir compte de la probabilité du

risque (section 2.7).

TABLE 5.2 – Analyse de l’effet de l’ajout d’une prime de 5 % pour évaluer un projet risqué (Price, 1989). Un projet risqué (et très caricatural) est évalué en calculant la valeur actuelle nette avec un taux d’actualisation de 10 % ou de 15 %. On note que la VAN est supérieure avec un taux d’actualisation de 15 %. Ajouter une prime au taux d’actualisation (pour tenir compte d’un risque) n’est donc pas forcément pénalisant.

Opération	Année	Montant	VA <sub>r=10%</sub>	VA <sub>r=15%</sub>
Construction d’une route	0	-300000 €	-300000	-300000
Exploitation forestière	1, 2, 3, 4, 5	200000 €/an	758157	670431
Restauration	6	-850000 €	-479803	-367478
VAN (€)			-21645	2953

### 5.2.6 Coût d’opportunité du capital

Les investissements forestiers peuvent être perçus comme des investissements comparables à des investissements financiers. Par conséquent, il existe pour les investissements forestiers un coût d’opportunité mesuré par le taux d’intérêt réel (section 5.3.2) d’un investissement alternatif comparable. Il est par conséquent souvent suggéré d’utiliser un taux d’actualisation équivalent à ce taux d’intérêt réel. Cette recommandation est très fréquente surtout pour les investissements forestiers. Cependant, cette approche n’est pas théoriquement valide (Price, 2014). Pour que ce soit le cas, il faudrait que les ressources d’un projet forestier puissent être entièrement récupérées et réinvesties dans un projet financier comparable et de même durée. Or, certains propriétaires (publics notamment) ne sont pas prêts à se séparer de leur propriété forestière, certains bénéfices comme ceux découlant de biens et services marchands ne peuvent pas être récupérés et il n’existe pas de produits financiers réellement comparables. Utiliser les taux d’intérêt observés sur les marchés des fonds financiers pour définir le taux d’actualisation n’est donc pas une approche rigoureuse.

## 5.3 Liens avec le taux d'inflation et d'intérêt bancaire

### 5.3.1 Inflation

L'inflation est une mesure de la hausse des prix. Elle est mesurée à partir de l'évolution de l'indice des prix, c'est-à-dire le prix d'un ensemble de produits bien définis (panier des ménages).

L'inflation fluctue au cours du temps (Figure 5.1) et elle est contrôlée par différentes institutions bancaires qui essaient de la maintenir à une valeur d'environ 2 %.

Cette notion est donc bien différente de la notion d'actualisation. L'actualisation traduit une préférence pour le présent alors que l'inflation traduit une diminution de la valeur d'une monnaie au cours du temps. L'actualisation peut très bien s'appliquer sur des unités non monétaires (ex. tonnes de carbone) alors que ce n'est pas le cas de l'inflation. L'actualisation est d'ailleurs justifiée même si l'inflation est nulle.

A titre d'illustration, si 200 000 € permettent aujourd'hui d'acheter une maison, il faudra  $200000 \times (1 + f)$  € pour acheter la même maison dans un an. La valeur de cet argent est donc réduite d'un facteur de  $\frac{1}{1+f}$  alors que la valeur de la maison est inchangée.

Le raisonnement est le même pour l'achat d'une forêt. On considère donc qu'une forêt ne perd pas de valeur du fait de l'inflation (contrairement à l'argent investi dans un placement bancaire).

### 5.3.2 Taux d'intérêt bancaire

Les banques proposent différents investissements (ex. compte épargne) caractérisés par un taux d'intérêt. Un propriétaire forestier pourrait être intéressé de comparer la rentabilité d'un placement bancaire et d'un investissement forestier (de risque jugé comparable). Il convient donc de s'intéresser aux liens et différences existant entre le taux d'intérêt d'un placement bancaire, le taux interne de rentabilité, et le taux d'actualisation (voir aussi section 5.2.6).

Le taux d'intérêt d'un placement bancaire a une signification très proche de celle du taux interne de rentabilité d'un projet forestier. Plus le taux d'intérêt est élevé ou plus le taux interne de rentabilité est élevé, plus la rentabilité de l'investissement est considérée élevée. Pour comparer rigoureusement les deux notions, il convient

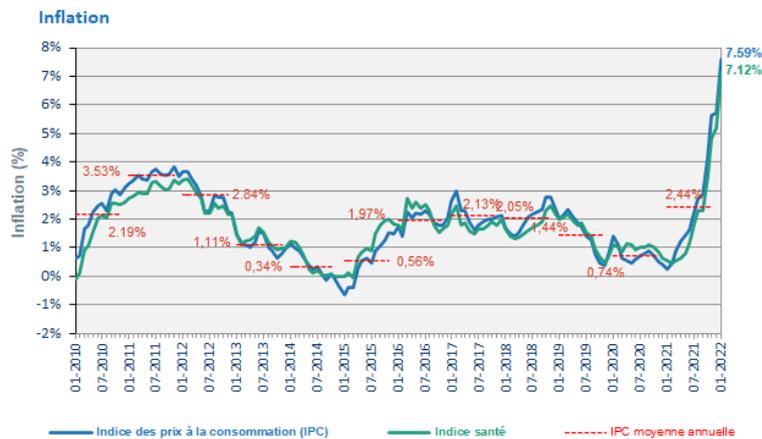


FIGURE 5.1 – Evolution de trois indices de consommation d’après STATBEL.

néanmoins de prendre en compte l’inflation et l’imposition des investissements considérés.

Soit un placement bancaire dont le capital de départ est de  $M \text{ €}$  (Figure 5.2). Si  $t$  est le taux d’intérêt nominal avant impôt, alors, après un an, l’investisseur reçoit  $M.t$  intérêts. L’investisseur doit aussi rétribuer une partie des intérêts sous la forme d’impôt :  $M.t.p$  où  $p$  est le taux d’imposition en vigueur. Après avoir payé les impôts, les intérêts restants sont :

$$M.j = M.t - M.t.p$$

$$j = t(1 - p)$$

où  $j$  est le taux d’intérêt nominal après impôts. En outre, la valeur de la monnaie a diminué au cours de l’année avec un taux d’inflation de  $f$ . La valeur du capital et des intérêts reçus est donc également inférieure d’un facteur de  $1/(1 + f)$ . La valeur du capital et des intérêts après un an et après impôt est donc de :

$$\frac{M}{1 + f} + \frac{M.t - M.t.p}{1 + f} = M.(1 + k)$$

où  $k$  est le taux réel après impôt. Ce dernier dépend donc du taux d’intérêt nominal avant impôt, du taux d’imposition et du taux d’inflation. A partir de la relation précédente, on trouve l’équation de Fisher :

$$(1 + k).(1 + f) = (1 + j)$$

$$j = k + f + kf$$

$$k = \frac{j - f}{1 + f} = \frac{1 + j}{1 + f} - 1$$

Etant donné que  $k$  et  $f$  sont des taux de valeur généralement inférieure à 10 %, le produit  $kf$  peut être négligé. On obtient alors :

$$j \approx k + f$$

ou

$$k \approx j - f$$

qui permet d'estimer facilement le taux réel d'un placement bancaire. Alors que  $f$  et  $j$  fluctuent rapidement dans le temps,  $k$  est généralement plus stable. En effet,  $j$  et  $f$  fluctuent souvent en tandem : ils augmentent ou diminuent de façon assez synchrone.

C'est ce dernier taux, le taux d'intérêt réel qui peut être comparé au taux interne de rentabilité d'un projet forestier.

$$k = \frac{1 + j}{1 + f} - 1 = \frac{1 + t.(1 - p)}{1 + f} - 1 = \frac{1 + t - tp - 1 - f}{1 + f}$$

$$k = \frac{t - f}{1 + f} - \frac{tp}{1 + f}$$

où le deuxième terme dépend de l'imposition et varie pour chaque propriétaire. Ainsi, en posant  $TIR > k$  permettant de garantir que l'investissement forestier est plus rentable que l'investissement bancaire, on obtient :

$$TIR > k$$

$$TIR > \frac{t - f}{1 + f} - \frac{tp}{1 + f}$$

$$TIR + \frac{tp}{1 + f} > \frac{t - f}{1 + f}$$

Terreaux (1990) a montré que le terme  $\frac{t-f}{1+f}$  était peu variable et approximativement égal à 1,8 % de 1969 à 1987. Si cela est vérifié et que le  $TIR$  est supérieur à 1,8 %, alors l'investissement forestier est plus intéressant qu'un placement bancaire (avec une marge de sécurité de  $\frac{tp}{1+f}$ ).

Pour illustrer cette notion, nous pouvons calculer le taux réel d'intérêt après impôt d'un compte épargne en 2023. Soit un épargnant qui dépose 10 000 € sur un compte épargne pour lequel le taux d'intérêt annoncé par le banquier est de 0,5 %. Etant donné qu'il n'y a pas d'impôt sur ce produit, il s'agit du taux d'intérêt nominal avant ou après impôt ( $t = j$ ). Après un an, l'épargnant dispose de  $M + M * t = 10\,050$  €. Si l'inflation est de 8 % (chiffre de 2023), l'épargnant aura besoin de 10 800 € pour acquérir les mêmes biens ou services qui lui auraient coûté 10 000 € un an plus tôt. 10 050 € correspondent donc à un pouvoir d'achat de  $10\,050 / (1 + f) = 9306$  € un an plus tôt. Dans ce cas, le rendement réel de cette épargne est négatif avec  $k = \frac{1+j}{1+f} - 1 = \frac{1+0,005}{1+0,08} - 1 = -6,94\% \approx 0,005 - 0,08 = -7,5\%$ . L'épargnant qui a placé 10 000 € voit donc son pouvoir d'achat diminuer de 694 €/an (en € de l'année initial du placement).

Pour terminer, il convient de souligner, une fois de plus, que si le taux d'actualisation est une notion qui peut sembler proche de celle du taux d'intérêt, sa signification est absolument différente et ces notions ne doivent pas être confondues. La notion d'intérêts perçus lors d'un placement ou payés lors d'un emprunt n'est, par exemple, pas acceptée selon la vision islamique stricte ou marxiste (Price, 2014). Pour la vision marxiste, les intérêts constituent des revenus qui ne sont pas mérités. La vision islamique stricte ou marxiste ne remet cependant pas en question l'actualisation des dépenses et recettes. L'actualisation a pour but de traduire la préférence pour le présent d'un agent économique. Le but n'est rien d'autre que d'essayer de prendre en compte cette préférence. Par contre, utiliser le taux interne de rentabilité consiste à rechercher à maximiser les intérêts pour un investissement donné.

### 5.3.3 Taux d'emprunt à long terme

Le taux interne de rentabilité et le taux d'actualisation sont parfois comparés aux taux d'emprunt à long terme (Obligations d'état). Pour des institutions notamment publiques, le taux d'emprunt à long terme représente aussi le coût annuel du capital et leur bilan financier est dès lors jugé favorable si les bénéfices annuels des investissements compensent au moins les coûts des emprunts. Les taux d'emprunt à long terme sont donc parfois utilisés pour comparer le TIR ou pour fixer le taux d'actualisation.

Cette approche discutable (section 5.2.6) demande de surmon-

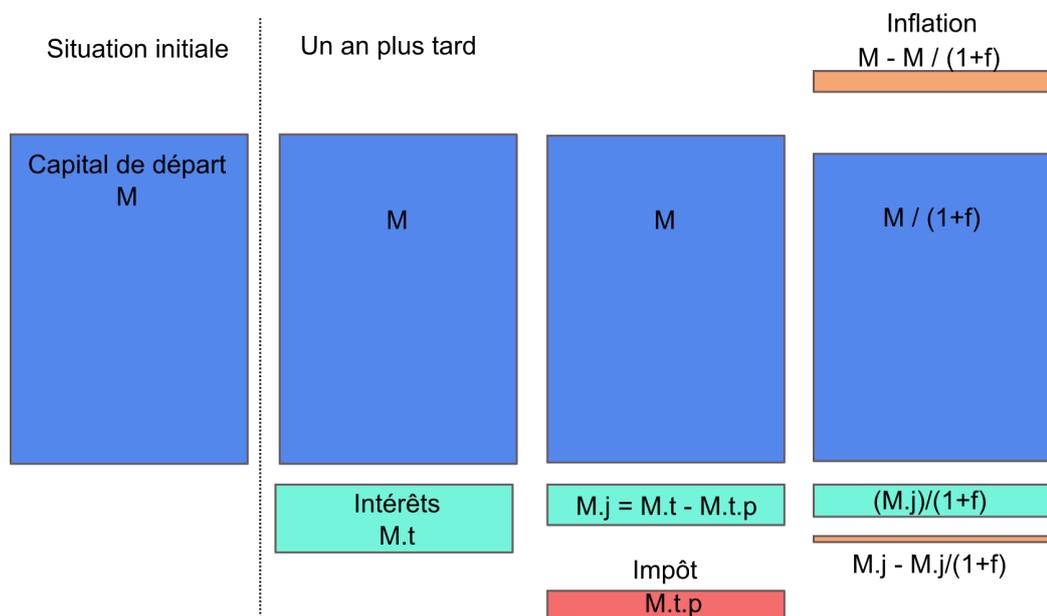


FIGURE 5.2 – Représentation des différentes composantes d'un placement bancaire et des intérêts qu'il génère avec  $t$  le taux d'intérêt nominal avant impôt,  $j$  le taux d'intérêt nominal après impôt,  $p$  le taux d'imposition et  $f$  le taux d'inflation.

ter une difficulté supplémentaire. Etant donné que les investissements forestiers sont réalisés pendant des durées particulièrement longues alors que les taux d'emprunt (et d'intérêt) fluctuent dans le temps (Figure 5.3), choisir un taux d'emprunt représentatif de l'entièreté de la durée d'un investissement forestier peut donc ne pas s'avérer si simple.



FIGURE 5.3 – Evolution du taux d'emprunt à long terme de trois états (OECD, 2022).

## 5.4 Valeurs de référence

Selon les auteurs, le taux d'actualisation utilisé pour évaluer des stratégies sylvicoles varie généralement entre 2 % et 4 % et différents arguments très pertinents peuvent être cités pour justifier un taux d'actualisation dans cette fourchette et même en dehors de cette fourchette (Möhring, 2001; Gosselin et al., 2011).

Notamment, des taux d'actualisation inférieurs à 2 % ont été suggérés pour les projets concernant des biens et services environnementaux et avec des échéances longues et donc aussi des niveaux d'incertitudes importants. Ainsi, Gollier (2010) préconise l'utilisation d'un taux d'actualisation écologique de 1,5 % pour évaluer des projets de préservation de la biodiversité et le rapport de Stern sur l'économie du changement climatique a choisi d'utiliser un taux d'actualisation de 1,4 % (Gosselin et al., 2011).

### 5.4.1 Taux appliqués par des institutions commerciales

Les institutions financières proposent des recommandations pour définir le taux d'actualisation à utiliser pour évaluer des décisions commerciales, généralement entre 6 et 10 %. La banque mondiale a, par exemple, recommandé l'utilisation d'un taux d'actualisation de 10 % en 1987 et 10 % était le taux recommandé au Royaume-Uni en 1970 y compris pour évaluer des projets forestiers (Price, 2014).

L'utilisation de taux aussi élevés peut paraître cohérent pour des projets de courte durée, surtout que la croissance économique ( $g$  dans l'équation 5.1) était soutenue à cette époque. Cependant, des taux aussi élevés semblent incohérent pour évaluer des projets d'investissements forestiers dont la durée d'investissement est très longue et dont les bénéfices reposent sur des biens et services environnementaux.

A titre d'illustration, une plantation de chêne d'un hectare qui nécessiterait un investissement de 5000 €, devrait alors (avec  $r = 10\%$ ) rapporter 950 milliards d'euros 200 ans plus tard. Avec de tels taux d'actualisation, pratiquement aucun projet forestier n'est rentable et les autres spéculations avec des échéances plus courtes deviennent plus rentables (agriculture, mine). En outre, de tels taux écrasent complètement les revenus et coûts distants dans le temps, vont à l'encontre d'une gestion durable et peuvent mener à négliger des conséquences graves (perte de fertilité) simplement si ces dernières interviennent à une date éloignée. Même avec des taux d'actualisation de 3 à 5 %, beaucoup de projets d'investissements forestiers ne sont pas justifiés.

### 5.4.2 Recommandations publiques

Depuis 1970, les taux d'actualisation utilisés au Royaume-Uni, comme dans d'autres pays ont été revus à la baisse pour évaluer des projets environnementaux caractérisés par de longues échéances. En France, le Commissariat Général du Plan (2020) préconise, pour les investissements publics, un taux d'actualisation de 4 % pour les projets de moins de 30 ans et un taux décroissant, compris entre 4 % et 2%, pour les projets de plus longue échéance. Une approche similaire est utilisée au Royaume-Uni(section 5.4.3).

TABLE 5.3 – Exemple d'évolution du taux d'actualisation avec la durée de l'investissement (Davies and Kerr, 2015).

Durée de l'investissement (années)	Taux d'actualisation (%)
0-30	3,5
31-75	3,0
76-125	2,5
126-200	2,0
201-300	1,5
301	1,0

### 5.4.3 Taux d'actualisation décroissant

Certaines institutions proposent d'utiliser des taux d'actualisation différents en fonction de la durée d'investissement. C'est notamment le cas au Royaume-Uni (Tableau 5.3)(Davies and Kerr, 2015) et en France. Les flux financiers d'un même échéancier ne sont donc plus nécessairement actualisés avec le même taux d'actualisation.

Utiliser un taux d'actualisation constant revient à assumer que la valeur d'un bien décroît exponentiellement avec le temps, c'est-à-dire que la même proportion de la valeur du bien est perdue à chaque pas de temps. En utilisant un taux d'actualisation décroissant, la relation n'est plus de nature exponentielle ce qui peut sembler plus en accord avec les préférences des agents économiques et plus éthique. Néanmoins, l'utilisation de taux d'actualisation décroissants n'est pas sans embûches, à la fois d'un point de vue théorique et pratique. Notamment, cette approche mène à des incohérences temporelles en termes de choix optimums. Par exemple, imaginons un peuplement régulier. Pour la première révolution, la durée de la révolution sera peut-être de 70 ans alors que la durée optimale de la seconde révolution sera peut-être de 80 ans car les flux financiers seront alors actualisés avec un taux d'actualisation plus faible. L'utilisation d'un taux d'actualisation complique donc nettement le calcul de  $VAN_{\infty}$ . L'équation 3.4 ne peut plus être utilisée et des approches numériques beaucoup plus complexes doivent être utilisées.

#### 5.4.4 Taux d'actualisation nul

Certains auteurs défendent l'utilisation d'un taux d'actualisation nul. Cela revient à dire que le temps n'a pas de valeur, qu'il n'y a pas de différence entre recevoir de l'argent aujourd'hui ou dans 100 ans. Ce choix peut être notamment justifié dans un souci d'égalité entre générations actuelles et futures (bien que  $r > 0$  reste défendable si  $\delta = 0$ , Equation 5.1). Notons qu'avec un taux d'actualisation nul, les critères de rentabilité n'ont alors plus de sens (si  $r = 0$  alors  $\text{VAN} = \text{BT}$ ).

### 5.5 Choix ou calcul du taux d'actualisation d'un projet forestier

Pour l'évaluation d'un projet forestier, nous avons vu que la valeur initiale de la forêt et du taux d'actualisation ne peuvent être fixés indépendamment. Par conséquent, deux approches peuvent être appliquées.

La première approche consiste à estimer le taux d'actualisation qui reflète les valeurs de fonds du marché actuel des ventes de biens forestiers. Une fois le fonds estimé, le taux d'actualisation est estimé en calculant le taux interne de rentabilité.

La deuxième approche consiste à fixer le taux d'actualisation en fonction du niveau de préférence pour le présent de l'agent économique, de l'échéance de l'investissement et des incertitudes sur la croissance des biens de consommation (croissance économique) mais aussi des biens et services environnementaux (croissance écologique).

Le choix entre l'une ou l'autre approche dépendra des informations à notre disposition. On choisira la première approche si on dispose de davantage d'informations concernant la valeur du fonds que concernant la préférence pour le présent de l'agent économique. Dans ce cas, on vérifiera cependant que le taux d'actualisation obtenu est cohérent et reflète une préférence pour le présent plausible.

Si l'on ne dispose pas davantage d'information pour fixer  $r$  ou  $F$ , il est conseillé de fixer le fonds (première approche). La plupart des résultats sont généralement moins sensibles à des variations de  $F$  qu'à des variations de  $r$ .

Avec l'une ou l'autre approche, il est prudent d'effectuer une analyse de sensibilité consistant à répéter les calculs en faisant varier

$r$  ou  $F$ .

## 5.6 Résumé

- L'actualisation est justifiée notamment par la préférence pure pour le présent et par un effet de richesse.
- Le taux d'actualisation doit néanmoins être modulé pour tenir compte d'un effet de précaution.
- Un taux d'actualisation écologique est défini pour les biens et services environnementaux. Il est généralement inférieur à celui appliqué pour des biens de consommation.
- Le taux d'actualisation utilisé pour évaluer des projets forestiers est généralement compris entre 2 et 4 %.
- Des taux d'actualisation encore plus faibles (1,4-1,6 %) sont utilisés pour évaluer des projets de préservation de la biodiversité ou d'atténuation des changements climatiques.
- Les notions d'inflation, de taux d'intérêt et de taux d'actualisation sont des notions bien distinctes bien qu'il existe des liens entre ces notions.
- Le taux interne de rentabilité peut être comparé au taux d'intérêt réel de placements financiers.

## 5.7 Exercices

### 5.7.1 Exercice 1

Une personne dispose de 500 € à placer. Le taux nominal proposé par le banquier est de 3,5 %. Cette personne est imposée à 25 % sur ses revenus et l'inflation est de 2 % par an.

1. Quel est le montant des intérêts avant impôt et hors inflation ?
2. Quel est le montant de l'impôt prélevé ?
3. Quel est le montant du capital (montant investi + intérêts) après un an ?
4. Quel est le pouvoir d'achat après un an ?
5. Quel est le taux de placement nominal après impôt ?
6. Quel est le taux de placement réel après impôt ?

### 5.7.2 Exercice 2

Pour une parcelle forestière donnée, le TIR est estimé à 1,404 %. On considère que les revenus du propriétaire qui découle de ses investissements bancaires sont imposés à hauteur de 25 % (et que le calcul du TIR a déjà pris en compte l'impôt sur les revenus forestiers). Le taux d'inflation est de 2 %.

Calculez le taux d'intérêt nominal avant impôt d'un placement bancaire de rentabilité comparable à celle de la parcelle forestière considérée.

### 5.7.3 Exercice 3

Si la pêche du thon continue au même rythme, on peut s'attendre à un revenu annuel net de 250 millions de Yen pendant les 10 prochaines années. Ensuite, l'activité devra être abandonnée car les rendements de pêche seront devenus trop faibles. Une alternative consiste à imposer un moratoire de 40 ans sur la pêche au thon. Après 40 ans, le stock sera reconstitué à un niveau tel que la pêche engendrera un revenu annuel net de 500 millions de Yen indéfiniment.

1. Calculer la valeur actuelle nette pour les deux stratégies avec un taux d'actualisation de 5 %
2. Quelles conclusions pouvez-vous en tirer ?
3. Est-il logique de fixer un taux de 5 % pour des flux portant sur une si longue durée ?
4. Que se passe-t-il si vous choisissez un taux plus adapté ?

# Chapitre 6

## De la valeur potentielle d'un arbre à l'évaluation de stratégies de martelage en futaie irrégulière

### 6.1 Introduction

Par ses choix, le sylviculteur peut orienter le développement d'un peuplement. Certaines opérations sylvicoles ont déjà été discutées dans les chapitres précédents. Le sylviculteur peut notamment définir un itinéraire sylvicole (l'ensemble des opérations de la plantation à la récolte dans les peuplements réguliers) et souhaiter comparer ces itinéraires. Différentes méthodes ont été décrites dans les chapitres 3 et 4 pour effectuer de telles comparaisons - une solution rigoureuse consiste à calculer la valeur actuelle nette. L'évaluation de la rentabilité d'autres opérations plus ponctuelles (protection, élagage) a également été abordée notamment au travers du calcul de la valeur actuelle nette des différentes stratégies. En outre, dans certaines situations (préjudice, vente), le gestionnaire doit parfois estimer la valeur d'un peuplement et nous avons aussi vu comment de telles estimations peuvent être obtenues (section 2).

Ces différentes méthodes sont cependant parfois difficiles à mettre en oeuvre. Il n'est parfois pas possible de rassembler l'ensemble des données nécessaires (ex. échéancier complet) et ces méthodes ne sont pas directement applicables à l'échelle de l'arbre. Pourtant, c'est bien à l'échelle de l'arbre que de nombreux choix importants

sont posés. Il s'agit, par exemple, du choix des arbres d'avenir et du choix des arbres à couper lors des éclaircies (martelage).

Evaluer l'effet d'un martelage avec les méthodes vues dans les chapitres 3 et 4 demanderait effectivement d'être capable de simuler l'effet du martelage sur l'évolution du peuplement pendant une durée assez longue (jusqu'à la mise à blanc dans les peuplements réguliers). Cependant, les outils de simulation à notre disposition ne permettent pas de faire cet exercice pour tous les types de peuplements et de sylvicultures (ex. peuplements irréguliers et mélangés). D'autres approches ont donc été développées pour essayer de faire fi de ces difficultés.

Ce chapitre présente une méthode d'évaluation de stratégie de martelage qui tient compte du potentiel de croissance en diamètre et en volume des arbres ainsi que de la variations de prix en fonction de la taille des arbres. C'est une méthode incomplète basée sur une évolution des arbres à relativement court terme. Elle a néanmoins le mérite de fournir des indicateurs supplémentaires qui peuvent s'avérer utiles pour discuter de l'intérêt de différentes opérations sylvicoles et, en particulier, du martelage.

Les éléments présentés dans ce chapitre sont essentiellement tirés de Bruciamacchie et al. (2008) et AFI (2020). Il existe d'autres méthodes pour évaluer la valeur d'un arbre qui ne sont pas abordées dans ce chapitre. Bien que leur fondement théorique soit parfois plus solide, leur mise en oeuvre est très compliquée et peu opérationnelle.

## 6.2 Valeur de consommation

La valeur de consommation ( $VC_i$ ) d'un arbre  $i$  correspond au prix de vente de l'arbre sur pied, c'est à dire le produit du prix unitaire ( $P_i$ ) et du volume commercialisé ( $V_i$ ) :

$$VC_i = P_i \times V_i \quad (6.1)$$

Eventuellement, la valeur de consommation pourra être adaptée pour tenir compte que l'arbre est composé de billons de qualité différentes. La valeur de consommation de l'arbre sera alors égale à la somme de la valeur de consommation des différents billons.

$$VC_i = \sum_j P_j \times V_j$$

### 6.3 Gain annuel

La valeur de consommation d'un arbre augmente généralement au cours du temps. Cette augmentation dépend de l'augmentation du volume ( $\Delta V_i$ ) et de l'augmentation du prix unitaire ( $\Delta P_i$ ) qui dépendent de l'augmentation du diamètre ( $\Delta D_i$ ). La variation unitaire peut également dépendre d'un changement de qualité mais cet effet est ignoré dans les formules qui suivent.

Le gain annuel ( $\delta_i$ ) correspond à l'augmentation de la valeur de consommation d'un arbre :

$$\delta_i = \frac{VC_i(t) - VC_i(t=0)}{\Delta T} = \frac{\Delta VC_i}{\Delta T}$$

où  $\Delta T$  est le nombre d'années de la période d'accroissement considérée,  $VC_i(t=0)$  et  $VC_i(t)$  correspondent à la valeur de consommation au début ( $t=0$ ) et à la fin de la période (après  $t$  années).

Afin de simplifier les notations, la valeur de consommation initiale sera par la suite simplifiée telle que  $VC_i = VC_i(t=0)$  et la même logique sera appliquée aux autres variables.

Si  $\Delta V_i$  correspond à l'accroissement en volume et  $\Delta P_i$  à la variation du prix unitaire de l'arbre  $i$ , alors l'équation 6.1 peut être réécrite en faisant apparaître ces deux composantes de l'accroissement en valeur de consommation :

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{(V_i + \Delta V_i) \cdot (P_i + \Delta P_i) - V_i \cdot P_i}{\Delta T} \\ &= \frac{V_i \cdot \Delta P_i + \Delta V_i \cdot P_i + \Delta V_i \cdot \Delta P_i}{\Delta T} \\ &= \frac{\Delta D_i}{\Delta T} \left( \frac{V_i \cdot \Delta P_i + \Delta V_i \cdot P_i + \Delta V_i \cdot \Delta P_i}{\Delta D_i} \right) \end{aligned}$$

et en posant que  $\Delta V_i \cdot \Delta P_i \approx 0$  puisque ce terme est nettement plus petit que les deux autres termes du numérateur :

$$\begin{aligned} \delta &\approx \frac{\Delta D_i}{\Delta T} \left( \frac{V_i \cdot \Delta P_i}{\Delta D_i} + \frac{\Delta V_i \cdot P_i}{\Delta D_i} \right) \\ &\approx \frac{VC_i \cdot \Delta D_i}{\Delta T} \left( \frac{\Delta P_i}{P_i \cdot \Delta D_i} + \frac{\Delta V_i}{V_i \cdot \Delta D_i} \right) \end{aligned}$$

Cette relation permet de mettre en évidence que le gain dépend de l'accroissement en diamètre de l'arbre ( $\frac{\Delta D_i}{\Delta T}$ ), de l'accroissement

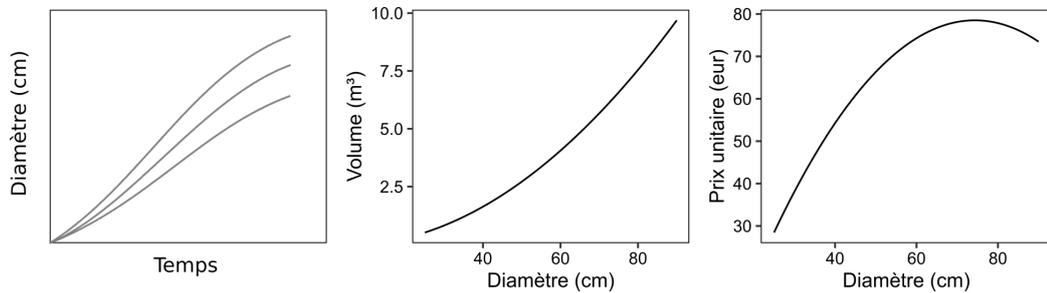


FIGURE 6.1 – Exemple de relations entre l'évolution du diamètre d'un arbre au cours du temps (croissance d'un arbre), entre le volume et le diamètre d'un arbre (tarif de cubage) et entre le prix unitaire et le diamètre (valeurs obtenues par exemple avec des mercuriales de prix, courbes de prix).

relatif du volume en fonction du diamètre ( $\frac{\Delta V_i}{V_i \cdot \Delta D_i}$ ) et de l'accroissement relatif du prix unitaire en fonction du diamètre ( $\frac{\Delta P_i}{P_i \cdot \Delta D_i}$ ). Une évolution théorique de ces trois composantes est illustrée dans la figure 6.1.

## 6.4 Taux de fonctionnement

Le taux de fonctionnement ( $\theta_i$ ) est le rapport entre le gain annuel et la valeur de consommation ou encore l'accroissement relatif de la valeur d'un arbre.

$$\begin{aligned} \theta_i &= \frac{\delta_i}{VC_i} \\ &\approx \frac{\Delta D_i}{\Delta T} \cdot \left( \frac{\Delta P_i}{P_i \cdot \Delta D_i} + \frac{\Delta V_i}{V_i \cdot \Delta D_i} \right) \\ &\approx \frac{\Delta D_i}{\Delta T} \cdot (\theta_{P_i} + \theta_{V_i}) \end{aligned}$$

Avec  $\frac{\Delta D_i}{\Delta T}$  l'accroissement en diamètre (cm/an),  $\theta_{P_i}$  l'accroissement relatif en prix unitaire et  $\theta_{V_i}$  l'accroissement relatif en volume. Cette formulation permet de distinguer l'effet des trois composantes déjà identifiées (Figure 6.2).

## 6.5 Valeur potentielle

La valeur potentielle ( $VP_i$ ) est obtenue en divisant le gain annuel par le taux d'actualisation ( $r$ ) :

$$VP_i = \frac{\delta_i}{r}$$

Cette valeur potentielle peut être interprétée comme le montant d'un investissement de taux  $r$  qui générerait des revenus équivalents aux gains (accroissement en valeur) pendant une durée infinie. Cette formule est comparable à la formule de la valeur actuelle nette d'une annuité (Equation 2.7).

La comparaison entre la valeur potentielle et la valeur de consommation d'un arbre indique s'il est préférable de garder l'arbre sur pied ou de le récolter. Pour un taux d'actualisation donné, l'arbre sera préservé si  $VP_i > VC_i$  (ou si  $\theta_i > r$  car  $\frac{VP_i}{VC_i} = \frac{\theta_i}{r}$ ) et il sera idéalement récolté si  $VP_i < VC_i$  ( $\theta_i < r$ ). Dans ce dernier cas, il est parfois dit que "l'arbre ne paie pas sa place" car lors de sa vente ultérieure  $VC_i$  sera récupéré mais le gain obtenu sera inférieur à  $VC_i \cdot (1 + r)^t$ . L'arbre ne permet pas de générer suffisamment d'intérêts.

Ce raisonnement fait néanmoins abstraction des particularités du voisinage d'un arbre. Par exemple, il peut ne pas être souhaitable d'ouvrir davantage un peuplement de faible densité et d'autres arbres doivent peut-être être récoltés de façon prioritaire.

Le terme d'exploitabilité idéale est donc défini lorsque  $VP_i = VC_i$  ou que  $\theta_i = r$ . Ce raisonnement permet de définir le taux d'exploitabilité pour chaque essence et qualité. Généralement, le terme d'exploitabilité est supérieur pour les arbres de meilleure qualité (Figure 6.3). Les courbes de prix (relations entre le prix unitaire et le diamètre) sont plus soutenues pour les arbres de meilleure qualité.

## 6.6 Aggrégation à l'échelle du peuplement

La valeur de consommation, le gain annuel, le taux de fonctionnement et la valeur potentielle peuvent également être calculés à l'échelle du peuplement, simplement en sommant la contribution de chaque arbre présent.

$$VC = \sum_i VC_i$$

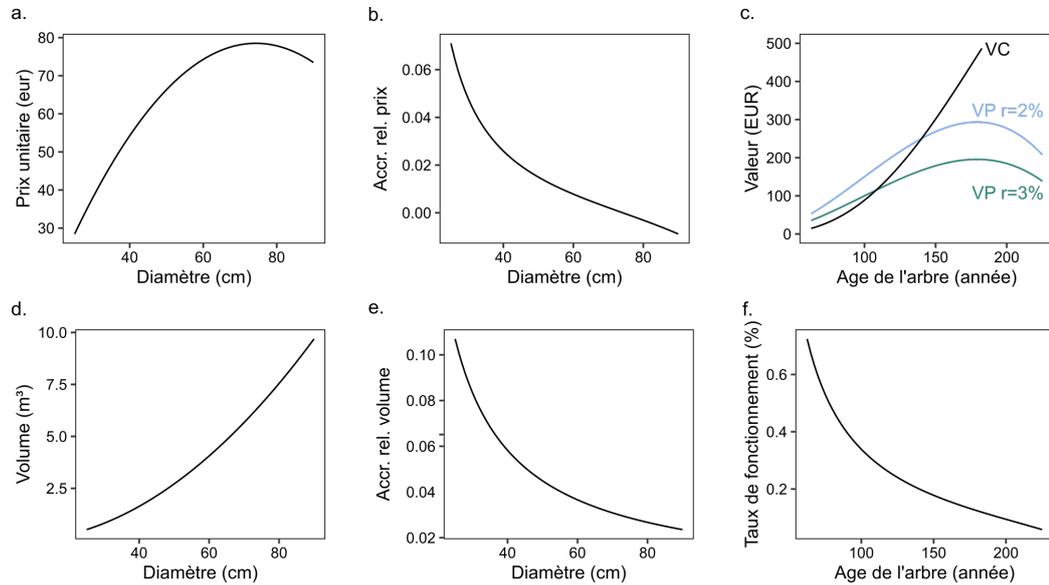


FIGURE 6.2 – Calcul de la valeur potentielle et du gain annuel en faisant les hypothèses d'un accroissement constant de 0,4 cm/an et de relations entre le prix unitaire et le diamètre (a) et entre le volume et le diamètre (d). Les accroissements relatifs des prix (b) et du volume (e) sont calculés à partir de la dérivée des graphiques précédents. Le gain annuel (f) est décroissant étant donné que les deux accroissements relatifs sont décroissants. La valeur potentielle est calculée pour deux taux d'actualisation. On remarque que  $VP = VC$  à des âges différents en fonction du taux d'actualisation choisi.

	A	B	C	D
Chêne	80 - 90	70 - 80	50 - 60	le
Hêtre	70 - 80	65 - 75	50 - 60	plus
Frêne	65 - 70	60	50	tôt
Merisier	65 - 70	60	50	possible
Erable S	65 - 70	60	50	selon
Aulne	65 - 70	40 - 45	35 - 40	voisins

FIGURE 6.3 – Exemple de termes d'exploitabilité proposés pour différentes essences et qualités.

$$VP = \sum_i VP_i$$

$$delta = \sum_i \delta_i$$

$$\theta = \frac{delta}{VP}$$

Ces calculs permettent d'obtenir de nouveaux indicateurs qui permettent d'évaluer assez finement l'effet de la sylviculture et notamment de comparer différents martelages.

La différence entre la valeur de consommation initiale et finale permet d'identifier les situations qui mènent à une capitalisation (différence positive) ou à une décapitalisation du peuplement (différence négative). A elle seule, cette différence n'est cependant pas très informative car il est parfois nécessaire de capitaliser ou de décapitaliser un peuplement. Le diagnostic peut alors être affiné en analysant la variation de la valeur de consommation et de la valeur potentielle au cours du temps. Afin de comparer des peuplements de surface terrière différente, il peut également s'avérer utile de calculer les rapports de la valeur de consommation sur la surface terrière ( $VC/GHA$ ) et de la valeur potentielle sur la surface terrière ( $VP/GHA$ ).

## 6.7 Taux d'actualisation et taux de fonctionnement de référence

L'évaluation d'un arbre ou d'un peuplement au travers du calcul de la valeur potentielle ou du taux de fonctionnement demande à nouveau de définir un taux d'actualisation (Chapitre 5). Ce taux d'actualisation devra notamment être en adéquation avec les exigences du propriétaire. Afin d'obtenir un point de comparaison, l'Association Futaie Irrégulière (AFI) a suivi une soixantaine de peuplements irréguliers de référence. Le taux de fonctionnement était généralement proche de 4 % (AFI, 2020). Ce taux peut cependant être adapté en fonction des potentialités locales et des essences présentes. Afin de préserver le mélange, le forestier peut en effet choisir de pénaliser certaines essences et de favoriser d'autres essences en augmentant ou en diminuant, respectivement, le taux d'actualisation. En augmentant le taux d'actualisation pour une essence, le

terme d'exploitabilité est réduit et davantage d'arbres de cette essence pourront être prélevés.

## 6.8 Prise en compte du risque

Le calcul du gain annuel peut être amélioré pour tenir compte de risques éventuels (ex. dépérissement de l'arbre, dégradation du bois).

### 6.8.1 Perturbation

Soit une perturbation dont la probabilité d'occurrence est de  $p$  et  $\beta$  la proportion de la valeur du peuplement qui est préservée en présence de l'aléa. Si  $\delta$  est le gain en l'absence de l'aléa, alors le gain annuel qui tient compte de la probabilité de l'aléa ( $\delta_r$ ) est sur une période d'un an :

$$\delta_r = (1 - p).(VC + \delta) + p.\beta.VC - VC$$

En tenant compte que  $\delta = VC.\theta$  où  $\theta$  est le taux de fonctionnement sans aléa, on obtient :

$$\delta_r = VC((1 - p).(1 + \theta) + p.\beta - 1)$$

Ce qui nous permet de calculer  $\theta_r$ , le taux de fonctionnement en tenant compte de la probabilité de l'aléa :

$$\theta_r = \frac{\delta_r}{VC} = (1 - p).(1 + \theta) + p.\beta - 1$$

Si la probabilité d'occurrence est déterminée pour une rotation de  $R$  années (et n'est plus une probabilité annuelle) et en supposant que l'aléa se produit à mi-période, on obtient :

$$\theta_r = \frac{(1 - p)(1 + \theta.R) + p\beta(1 + \theta.R/2) - 1}{R}$$

### 6.8.2 Risque d'altération du bois

Une part non négligeable des revenus forestiers sont issus de la récolte d'arbres de grande dimension. Néanmoins, plus un arbre vieillit plus le risque d'apparition d'altérations du bois augmente

également (ex. coeur rouge du hêtre). Si  $p$  est la probabilité annuelle d'apparition d'une altération du bois ;  $\delta$ , le gain annuel en l'absence d'altération ;  $\delta_a$ , le gain annuel en présence d'altération. Alors le gain annuel qui tient compte de la probabilité de l'altération du bois ( $\delta_r$ ) devient :

$$\delta_r = (1 - p) \cdot \delta + p \cdot \delta_a$$

Cette équation d'apparence assez simple cache cependant la difficulté d'estimer la probabilité d'altération et le gain annuel qui sera obtenu si cet altération se réalise. Pour les estimer dans le cas d'un risque d'altération du bois, il faudrait par exemple analyser des souches pour estimer des probabilités d'altération en fonction du diamètre et disposer de mercuriales adaptées aux bois sains et altérés.

## 6.9 Résumé

Ce chapitre présente le calcul de la valeur de consommation ( $VC_i$ ) et la valeur potentielle ( $VP_i$ ) au travers du calcul du gain en valeur ( $\delta$ ) avec :

$$\delta_i = \frac{VC_i(t) - VC_i(t = 0)}{\Delta T}$$

$$VP_i = \frac{\delta_i}{r}$$

Il est également possible de calculer le taux de fonctionnement de chaque arbre, une grandeur qui a une signification proche du taux interne de rentabilité. C'est le taux d'actualisation pour lequel  $VP_i = VC_i$  :

$$\theta_i = \frac{\delta_i}{VC_i}$$

Les indices calculés à l'échelle de l'arbre peuvent être agrégés à l'échelle du peuplement, par exemple, pour évaluer une stratégie de martelage.

Les différents indicateurs peuvent également être adaptés pour tenir compte de risques (moyennant l'acquisition de données supplémentaires pour caractériser ces risques).

## 6.10 Exercices

### 6.10.1 Exercice 1

Vous disposez d'un tarif de cubage permettant de prédire le volume ( $V$  en  $\text{m}^3$ ) d'un arbre de diamètre  $dhp$  et d'une courbe de prix permettant d'estimer le prix unitaire ( $P$  en  $\text{€}/\text{m}^3$ ).

$$V = -0.0166 - 0.0120dhp + 0.00133dhp^2$$

$$P = -55.1 + 3.06dhp - 0.0206(dhp)^2$$

1. Quelle est la valeur de consommation d'un arbre de 80 cm de diamètre ?
2. Quelle sera la valeur de consommation dans 10 ans d'un arbre qui a aujourd'hui un diamètre de 80 cm, en considérant qu'il aura un accroissement diamétrique de 0,5 cm/an ?
3. Quel sera le gain annuel en valeur d'un arbre qui a aujourd'hui un diamètre de 80 cm, en considérant qu'il aura un accroissement diamétrique de 0,5 cm/an ? Considérez une période de 10 ans pour calculer ce gain.
4. Quel est le taux de fonctionnement d'un arbre qui a aujourd'hui un diamètre de 80 cm, en considérant qu'il aura un accroissement diamétrique de 0.5 cm/an ? Considérez une période de 10 ans pour calculer ce taux.
5. Quelle est la valeur potentielle d'un arbre qui a aujourd'hui un diamètre de 80 cm, en considérant qu'il aura un accroissement diamétrique de 0.5 cm/an ? Considérez une période de 10 ans pour calculer cette valeur et un taux d'actualisation de 3 %.
6. Comparer la valeur de consommation et la valeur potentielle d'un arbre qui a aujourd'hui un diamètre de 80 cm, en considérant qu'il aura un accroissement diamétrique de 0,5 cm/an ? Considérez une période de 10 ans. Utilisez un taux d'actualisation de 3 %. Que signifie la différence entre ces deux valeurs ?

# Chapitre 7

## Vers une meilleure prise en compte des multiples services et biens forestiers, marchands et non marchands

Tout ce qui est simple est faux, mais tout ce qui ne l'est pas est inutilisable.

---

Paul Valéry

### 7.1 Introduction

Les forêts délivrent une multitude de biens et de services. Certains ont une valeur marchande et d'autres pas. Dans les chapitres précédents, la valeur des biens non-marchands a peu été discutée et n'a pas fait l'objet d'une quantification (notamment car leur prise en compte n'engendrait pas l'ajout de dépenses et ou de recettes dans les échéanciers utilisés). En outre, nous avons le plus souvent considéré un seul bien ou service marchand et non pas une multitude de biens et de services.

Pourtant, seule la prise en compte de la multitude des biens et services permet d'expliquer la plupart des choix des gestionnaires forestiers, des décideurs politiques, ... Si certains gestionnaires refusent d'effectuer des coupes rases et si le législateur interdit le

boisement de résineux le long de cours d'eau, ce n'est pas dans un souci d'optimiser la rentabilité de la production de bois mais plutôt de concilier la production de bois avec d'autres objectifs.

L'évaluation de la valeur de services non marchands ainsi que la prise en compte de multiples services font l'objet de multiples ouvrages d'économie environnementale. Etant donné son ampleur et son importance, cette thématique ne sera pas abordée pleinement dans ce chapitre. Ce chapitre présente plutôt un éventail non exhaustif de méthodes. Elles seront brièvement présentées et illustrées.

## **7.2 L'évaluation de biens et services non marchands**

### **7.2.1 Théorie**

Contrairement aux biens et services marchands, les biens et services non-marchands produits par une forêt ne sont pas exclusivement perçus par le propriétaire de cette forêt. Ils sont souvent perçus par plusieurs individus, des collectivités, à une échelle locale, régionale (qualité de l'eau) ou globale (stockage du carbone) (Figure 2.1). L'évaluation doit donc débiter par identifier la collectivité concernée afin de comparer l'ensemble des coûts et des bénéfices perçus par cette collectivité. Il ne serait, en effet, pas cohérent de mélanger des coûts et des bénéfices estimés pour différentes échelles.

La valeur d'un bien ou d'un service marchand est évaluée en calculant le surplus du consommateur et le surplus du producteur, deux grandeurs qui sont estimées à partir des courbes de la demande (prix d'un bien consommé en fonction du nombre d'unités consommées) et de l'offre (prix d'un bien produit en fonction du nombre d'unités produites, Figure 7.1). Pour les biens et services non marchands, de telles courbes n'existent pas et elles doivent être estimées au travers d'estimations du consentement à payer (ou à recevoir).

Certaines méthodes sont dites directes car elles consistent à utiliser un marché fictif pour faire exprimer le consentement des individus. Il s'agit notamment de l'évaluation contingente. D'autres méthodes sont dites indirectes car elles se basent sur des marchés

annexes pour révéler le comportement des individus et en déduire ensuite leur consentement à payer (méthode des coûts de déplacements, méthode des prix implicites).

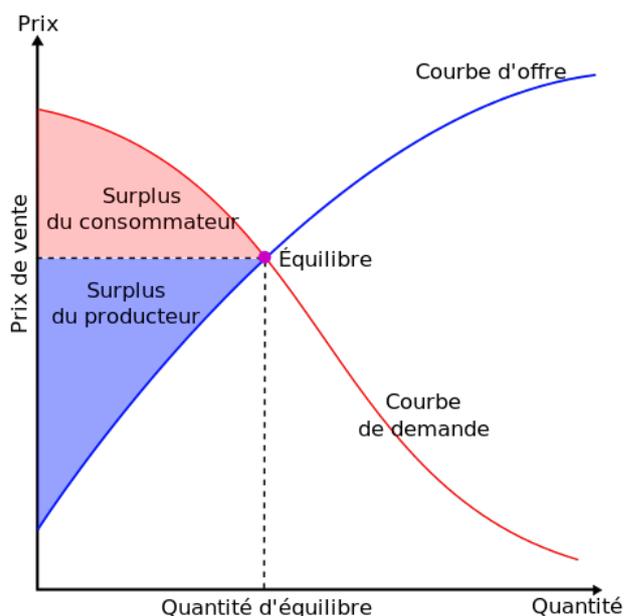


FIGURE 7.1 – Illustration du surplus du consommateur et du producteur. Prenons le cas d'un péage pour traverser un pont. Il y a des individus qui seraient prêts à payer davantage que le prix fixé pour traverser le pont. La différence entre le prix maximum qu'ils seraient prêts à payer et le prix payé représente le surplus du consommateur. Graphiquement, le surplus du consommateur est donné par la surface sous la courbe de demande au-dessus du prix d'équilibre (surface rouge).

A partir des informations collectées, l'annuité constante équivalente (ACE) d'un bien ou d'un service pourra être calculée. L'annuité constante équivalente correspond à la recette maximale qu'un agent ou une collectivité pourrait recevoir chaque année pour des biens et services non marchands (à partir de l'année 1 jusqu'à l'infini). La valeur actuelle de l'annuité est :  $VA = ACE/r$ .

Ces méthodes sont applicables dans le domaine de la recherche mais elles sont souvent trop laborieuses que pour être utilisées dans le cadre d'expertises ou si une multitude de biens et services sont considérés. Des procédures et règles plus approximatives ont dès lors été mises au point.

### 7.2.2 Evaluation contingente

L'évaluation contingente consiste à demander à la population cible de déclarer son consentement à payer (CAP) pour une variation de l'offre d'un bien ou service. La méthode consiste à définir un échantillon de la population cible et d'interroger les personnes échantillonnées. La construction du formulaire est une opération délicate afin de limiter autant que possible les différents biais. Les répondants devront dans un premier temps être informés du contenu de l'actif et des caractéristiques des biens et services considérés. Le formulaire permet de recueillir des informations socio-économiques pour chaque répondant afin d'extrapoler les résultats à la population cible. Enfin, le formulaire sera finalisé avec des questions permettant d'évaluer le consentement à payer en unités monétaires. Par exemple, le questionnaire pourrait contenir les questions suivantes : Accepteriez-vous de payer 50 €/an pour ce service ? Dans l'affirmative, jusqu'à quelle somme accepteriez-vous de payer pour ce service ?

La méthode comporte de nombreux biais potentiels. Par exemple, le répondant peut être incapable de se projeter dans la situation du marché fictif (biais hypothétique), le répondant peut tenir compte de biens et services supplémentaires à ceux qui sont évalués (biais d'inclusion), l'enquêteur peut orienter le répondant (biais de l'enquêteur), le répondant peut biaiser sa réponse dans l'espoir que sa réponse impactera la décision (biais stratégique), le répondant peut être influencé par les montants proposés dans le formulaire (biais d'ancrage)...

#### Illustration de la valeur d'aménité pour une collectivité

- Une population de 50 000 citoyens est susceptible d'accéder à la forêt.
- A partir d'un échantillon de la population a été interrogés pour estimer le CAP par personne.
- L'analyse permet de dire que le CAP moyen est de 20 €/an.
- $ACE = 20 \times 50000 = 10^6$  €/an.
- Si la forêt est de 100 ha, et  $r = 3 \%$ , alors  $VA = 10^6 / (100 \times 0,03) = 3333$  €/ha.

#### Illustration de la valeur d'aménité pour un propriétaire privé

- Le propriétaire se dit prêt à payer 2 € par visite d'une forêt de 25 ha.
- Il estime effectuer 100 visites par an .
- Il utilise un  $r = 3\%$ .
- $ACE = 2 \times 100 = 200 \text{ €/an}$  .
- $VA = \frac{200}{25 \times 0,03} = 266 \text{ €/ha}$ .

### 7.2.3 Coût de déplacement

La méthode des coûts de déplacement consiste à évaluer la valeur des coûts consentis pour profiter d'un actif (d'une forêt). Il s'agit des coûts de déplacement et éventuellement d'un coût d'opportunité correspondant au temps consacré à l'utilisation de l'actif (ex. une fraction du salaire).

La relation entre la demande et le prix est établie en faisant l'hypothèse que l'instauration d'un péage à l'entrée de la forêt aurait les mêmes effets que l'augmentation du coût de trajet.

**Illustration** Afin d'évaluer la valeur d'une forêt, on souhaite estimer les coûts des déplacements consentis par la collectivité environnant cette forêt. Afin de simplifier l'enquête, les visiteurs potentiels ont été répartis en trois zones géographiques à l'intérieur desquelles le coût de déplacement a été supposé constant. Pour chaque zone, le coût unitaire de déplacement, la taille de la sous-population ont été définis (Tableau 7.1). Le nombre de visiteurs a également été estimé à l'aide d'un questionnaire.

Ces informations permettent d'établir la relation entre le nombre de visites/1000 habitants et le coût du déplacement (Figure 7.2a). Cette courbe n'est néanmoins pas une courbe de demande-prix. L'axe des ordonnées est une proportion de visiteurs et pas un nombre total de visiteurs. En outre, le coût du trajet sur l'axe des abscisses ne correspond pas au consentement à payer. Certains utilisateurs sont vraisemblablement prêts à payer plus que le coût du trajet.

Il convient d'estimer le nombre total de visites (les trois zones comprises) en fonction du consentement à payer. Dans un premier temps, le nombre de visites/1000 habitants est estimé par zone et pour différents prix d'entrée. Cette proportion est estimée en faisant l'hypothèse que l'ajout d'un prix d'entrée est équivalent à une augmentation des coûts de déplacement. La relation de la figure 7.2a est utilisée en remplaçant le coût du trajet par le coût total (Tableau

TABLE 7.1 – Evaluation du consentement à payer avec la méthode des coûts de déplacement. Pour trois zones géographiques, les coûts de déplacements, le nombre de visiteur et la taille de la population cible ont été estimés.

Zone	Coût/visite	Nb. visiteurs	Population	Visites/1000 pers.
1	2€	500	1000	500
2	6€	1200	4000	300
3	10€	1000	10000	100

7.2). En multipliant ensuite le nombre de visites/1000 habitants par le nombre d'habitants de chaque zone, on trouve le nombre de visites total en fonction du prix d'entrée, soit la courbe de demande-prix (Figure 7.2b). L'aire sous cette courbe correspond alors à l'annuité constante équivalente (surplus du consommateur). Elle est approximativement égale à la somme de l'aire grisée de la figure 7.2b, soit :

$$\frac{2700 + 1075}{2} 2,5 + \frac{1075 + 450}{2} (5 - 2,5) + \frac{450 + 125}{2} (7,5 - 5) + \frac{125}{2} (10 - 7,5) = 7500$$

L'annuité constante équivalente de 7500 €/an correspond au montant que les 2700 visiteurs sont prêts à payer en plus du coût des trajets (ou encore  $7500/2700 = 2,78\text{€/habitant/an}$ ). C'est aussi le montant fictif (relatif à un marché fictif qui n'existe pas dans la réalité) qu'un propriétaire pourrait percevoir en installant un péage à l'entrée de la forêt.

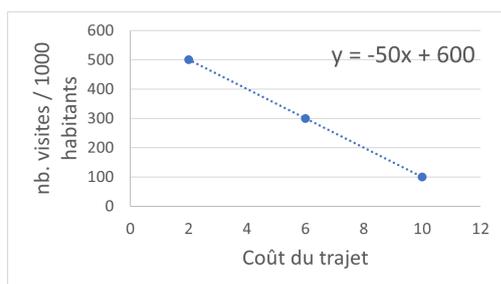
L'approche qui est illustrée ici présente différentes limites. Les résultats dépendent de la méthode d'enquête et négligent certaines composantes. Le coût du temps passé lors de la visite en forêt n'est pas pris en compte. Mais quelle est la valeur de ce temps ? Il pourrait être estimé à partir d'un salaire horaire. Mais ce dernier n'est pas le même pour tous... En outre, le coût du déplacement n'est pas inclus dans le calcul de la valeur de l'actif. La valeur d'existence n'est pas incluse non plus. Du fait de ces limites, la valeur obtenue est vraisemblablement sous-estimée. Il s'agit de la borne inférieure de la valeur de l'actif.

TABLE 7.2 – Construction de la courbe demande-prix pour évaluer le consentement à payer avec la méthode des coûts de déplacement avec les données présentées dans le tableau 7.1. Il convient d'estimer dans un premier temps le nombre de visites/1000 habitants pour différentes situations fictives caractérisées par des prix d'entrée distincts. Ensuite, le nombre de visites total est estimé en fonction du prix d'entrée.

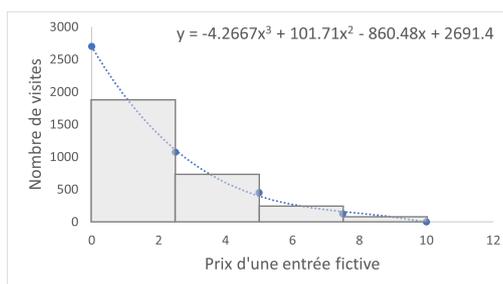
		<b>Nb visite / 1000 habitant</b>				
		$-50 \cdot (\text{coût entrée} + \text{trajet}) + 600$				
		Prix d'une entrée fictive				
zone	Coût trajet/visite	0	2.5	5	7.5	10
1	2	500	375	250	125	0
2	6	300	175	50	0	0
3	10	100	0	0	0	0

		<b>Nb visites total</b>				
		Prix d'une entrée fictive				
zone	Nb. habitants	0	2.5	5	7.5	10
1	1000	500	375	250	125	0
2	4000	1200	700	200	0	0
3	10000	1000	0	0	0	0
<b>somme</b>		<b>2700</b>	<b>1075</b>	<b>450</b>	<b>125</b>	<b>0</b>



(a)



(b)

FIGURE 7.2 – Proportion de la population qui consent à accéder à la forêt en fonction du coût du déplacement (a) et la courbe demande-prix correspondante (b). L'aire sous la courbe demande-prix permet d'estimer l'annuité constante équivalente (surplus) pour le service de récréation.

### 7.2.4 Autres méthodes

De nombreuses autres méthodes ont été employées pour évaluer la valeur de services écosystémiques forestiers. On peut citer la méthode des prix implicites ou hédonistes qui utilise des données d'échanges commerciaux. Par exemple, la valeur d'un service (ex. pollution, paysage) peut être évaluée en analysant le prix de vente de biens immobiliers (maisons). Si la présence de forêt permet d'éviter certains dommages, l'évaluation des dommages potentiels peut fournir certains éléments d'évaluation. Il est également possible de calculer le coût d'une installation artificielle qui remplirait la même fonction (stockage de l'eau et réduction du ruissellement) ou la méthode des choix expérimentaux.

## 7.3 Evaluer de multiples services écosystémiques

Les méthodes d'évaluation présentées jusqu'ici permettaient d'évaluer la valeur d'un service écosystémique unique ou d'un nombre assez restreint de services. La multifonctionnalité des forêts est néanmoins une réalité omniprésente pour le gestionnaire forestier. Le défi consiste à agréger différentes estimations, qui ne sont parfois pas comparables (ex. unités différentes) afin, par exemple, d'identifier les itinéraires de gestion à favoriser.

### 7.3.1 Modèle de Hartman

Le modèle de Hartman a été utilisé pour analyser comment la gestion forestière peut impacter la valeur d'une parcelle forestière en tenant compte à la fois du service de production de bois et d'un ou plusieurs autres services écosystémiques (appelé, par simplicité, bénéfices environnementaux dans la suite de cette section) dont on peut estimer la valeur monétaire.

Ce modèle est une amélioration de la formule permettant de calculer la valeur actuelle nette à perpétuité pour un cycle de production défini. Pour chaque année, la valeur monétaire du bénéfice environnemental ( $B_i$  est estimé et sa valeur actualisée est simplement additionnée :

$$W = \text{VAN}_{0 \rightarrow \text{inf}} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{R_{(i)} - D_{(i)}}{(1+r)^i} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{B_{(i)}}{(1+r)^i}$$

Il est alors possible de chercher l'itinéraire sylvicole qui permet de maximiser cet indicateur. Dans certains cas, la valeur des bénéfices environnementaux ne varie pas dans le temps. Dans ce cas, on obtient :

$$W = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{R_{(i)} - D_{(i)}}{(1+r)^i} + \frac{ACE}{r}$$

où  $ACE$  est l'annuité constante équivalente. Il convient d'être attentif à la nature des bénéfices environnementaux qui sont inclus dans ce calcul. Par exemple, pour un propriétaire forestier, 1000 € de bénéfices issus de la production de bois (ceux qui génèrent des rentrées financières) n'a peut-être pas la même importance que 1000 € de bénéfices environnementaux qu'il perçoit personnellement (récréation et aspect paysager) ou encore que 1000 € de bénéfices environnementaux perçus par la population environnante. Même si toutes ces grandeurs sont exprimées avec les mêmes unités, ces grandeurs restent délicates à comparer.

### 7.3.2 Analyse coût-bénéfice

La technique des analyses coût-bénéfice<sup>1</sup> fait à elle seule l'objet d'ouvrages entiers. Cette technique consiste à mesurer si les bénéfices d'une action sont supérieurs aux coûts engendrés en prenant le point de vue de la société dans son ensemble. C'est un instrument important pour la mise en place de politiques environnementales (Hanley and Barbier, 2009).

Brièvement, il conviendra de définir l'objectif et les contours du projet envisagé (ex. échelle temporelle et spatiale), définir les scénarios alternatifs, identifier et quantifier l'ensemble des impacts du projet (souvent avec une certaine incertitude), évaluer la valeur monétaire de ces impacts, actualiser et synthétiser les coûts et bénéfices en calculant la valeur actuelle nette du projet, comparer la valeur actuelle nette de différentes alternatives et effectuer des analyses de sensibilité pour vérifier que le changement de certaines

---

1. Cost-benefit analyses

hypothèses (ex. quantification des impacts, taux d'actualisation) ne modifie pas la conclusion.

L'analyse coût-bénéfice présente de nombreuses limites : celles des méthodes d'évaluation, prise en compte des risques, choix du taux d'actualisation. Elle permet néanmoins de quantifier de manière assez formelle et transparente les impacts d'un projet et de servir de base de discussion.

A titre d'exemple, Price and Price (2008) présentent les résultats d'une analyse coût-bénéfice afin d'identifier si, en Ecosse, la sylviculture de peuplements réguliers<sup>2</sup> est préférable à trois sylvicultures alternatives maintenant un couvert continu<sup>3</sup>. Afin de répondre à cette question, ils ont évalué la valeur monétaire, pour chaque stratégie, de la quantité et qualité de la production de bois, du coût de l'exploitation, de la réduction des réserves en eau, de l'augmentation de l'érosion, de l'acidification des cours d'eau, du stockage de carbone, des services de récréation, d'impacts paysagers, d'impacts sur la biodiversité et de la répartition des bénéfices/pertes entre les acteurs économiques... Pour chacun de ces aspects, différentes méthodes ont été utilisées et leur aggrégation (somme des bénéfices et des pertes) est finalement délicate.

### 7.3.3 Front de Pareto

Lorsqu'un grand nombre d'alternatives est possible et lorsqu'il n'est pas possible de construire un indicateur unique, il n'est pas toujours possible ou souhaitable d'identifier une solution optimum.

Imaginons que différentes alternatives de gestion soient évaluées au regard de la production de deux biens et que la valeur de ces biens soit difficile à comparer (ex. différentes unités). On cherchera alors plutôt à identifier l'ensemble des alternatives pour lesquelles il n'existe pas de meilleure alternative, c'est-à-dire les alternatives qui sont sur le front de Pareto (Figure 7.3).

La méthode n'assume aucune égalité ou pondération entre les critères et ne permet pas de discriminer les alternatives situées sur le front de Pareto.

A titre d'illustration, cette méthode a été appliquée par Lafond et al. (2017) pour évaluer les meilleures stratégies sylvicoles pour des peuplements irréguliers en montagne. Pour chaque stratégie,

---

2. Rotational silviculture

3. Shelterwood system, Group felling, Single tree selection system

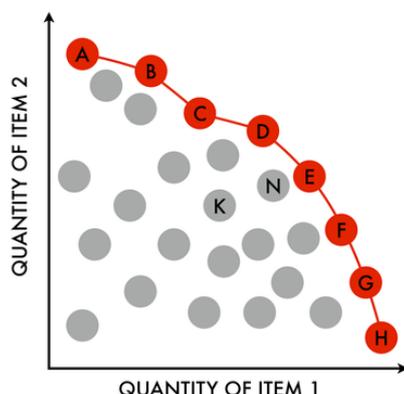


FIGURE 7.3 – Evaluation de la production de deux biens pour différentes stratégies. Les alternatives A-H (en rouge) sont les alternatives sur le front de Pareto jugées optimums. L'alternative K n'est pas optimale car il existe des situations plus favorables avec plus de biens 1 (E) et plus de biens 2 (D).

ils ont évalué le volume de bois produit, un score de diversité du bois mort, un score de diversité floristique et un score de protection (contre les avalanches). L'ensemble des scénarios identifiés sur le front de Pareto (à plusieurs dimensions) a permis d'identifier les compromis et synergies liés aux choix sylvicoles (Figure 7.4). Par exemple, l'augmentation du score de diversité de bois mort ne serait possible que si l'on accepte de diminuer le volume exploité. Cet exemple met en évidence qu'il est difficile de mettre tous les services sur un même pied d'égalité. Pour certains critères, il faut sans doute atteindre un seuil minimum alors que l'on cherchera à augmenter d'autres critères tout en gardant des valeurs acceptables pour un ensemble d'autres critères.

#### 7.3.4 Matrice des services écosystémiques

Quantifier précisément la valeur d'un service écosystémique est une tâche relativement complexe qui requiert du temps et des ressources. Effectuer ce travail pour une multitude de services écosystémiques peut donc rapidement devenir laborieux.

Une approche plus rapide consiste à établir une matrice des services écosystémiques. Dans sa version la plus simple, différents services écosystémiques (en colonne dans la matrice) sont évalués pour différentes classes d'utilisation du sol (en ligne). Les services sont

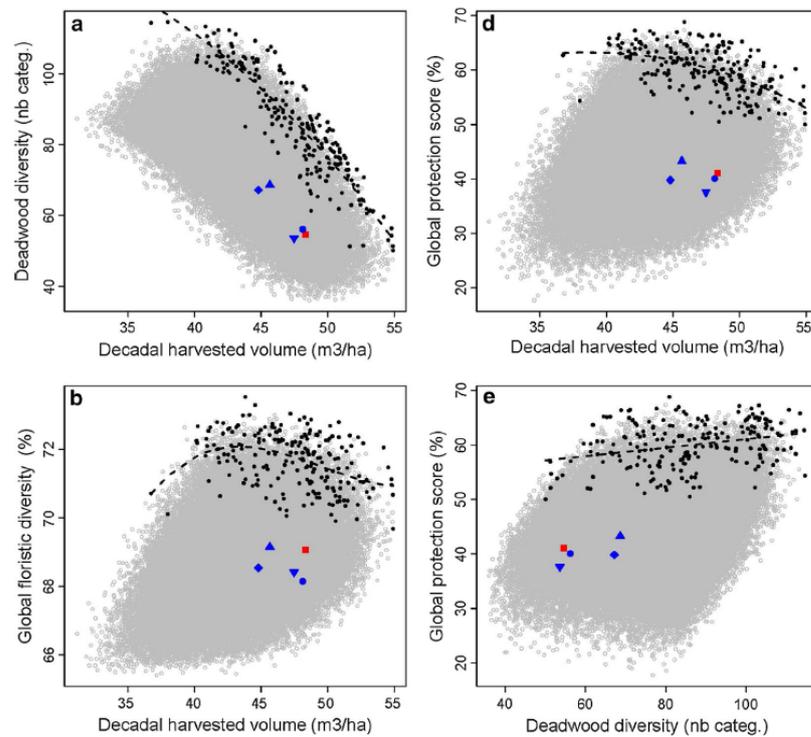


FIGURE 7.4 – Identification de scénarios sylvicoles optimums (en noir) situés sur le front de Pareto (Lafond et al., 2017). Le scénario en rouge correspond au scénario “Business as usual” et les scénarios en bleu sont des scénarios de référence.

évalués avec un score allant, par exemple, de 1 (fourniture minimale du service) à 6 (fourniture maximale du service). Ce score est une variable qualitative ordinale (un classement) et les valeurs sont le plus souvent déduites d'entretiens avec des experts, de l'utilisation de modèles existants ou de références bibliographiques. Une fois la matrice obtenue, il est possible de cartographier la provision des services écosystémiques, d'identifier les zones d'actions prioritaires et de visualiser l'impact de changements d'utilisation du sol.

Cette méthode a par exemple été appliquée par Maebe et al. (2018) pour un massif forestier près de Saint-Hubert en Belgique. Le massif est composé de deux grandes catégories de peuplements : des futaies irrégulières feuillues et des pessières régénérées par coupes rases. Six services ont fait l'objet d'une évaluation pour ces deux types d'utilisations qui ont en outre été décliné par types de sols (amélioration de la méthode originale). Cette méthode a notamment permis de mettre en évidence les avantages et inconvénients de différents itinéraires sylvicoles et de vérifier comment ces choix affectent les intérêts individuels et collectifs. Tout au long du processus, différents ateliers participatifs ont été réalisés avec les acteurs locaux (identification des objectifs, analyse des impacts).

### 7.3.5 Analyses multi-critères

L'analyse multi-critère est un outil analytique couramment utilisé pour évaluer l'impact de différentes alternatives sur la base d'un ensemble de critères d'évaluation (Maebe, 2024). Les critères peuvent être évalués avec des unités différentes. Pour chacun d'entre eux, un poids est déterminé. Après normalisation des critères, ceux-ci sont agrégés en tenant compte des poids déterminés (ex. somme pondérée) afin d'obtenir un indicateur synthétique. Des algorithmes et procédures différents ont été développés pour structurer et combiner les informations.

La méthode a été employée par Maebe (2024) pour évaluer l'impact de différents itinéraires de gestion dans une forêt en Belgique (Sivry-Rance). Après avoir défini les itinéraires de gestion, différents services écosystémiques ont été évalués pour chacune de ces stratégies. Des critères ont été calculés pour évaluer entre autres les bénéfices de la production de bois, les préférences des utilisateurs (paysage, récréation), ainsi que les impacts sur la qualité de l'eau, la séquestration du carbone, les populations d'insectes et la réduc-

## FUTAIE PURE ÉQUIENNE D'ÉPICÉA AVEC MISE À BLANC

Contexte	Bois	Carbone	Inond	Sédi	NO3-P	Tourisme	Surface	% surface
Bons sols	6	5	5	5	3	3	10770 ha	41 %
Fortes pentes	4	3	2	1	2	1	257 ha	1 %
Sols alluviaux	6	3	2	0	0	2	656 ha	3 %
Sols humides	3	2	1	1	1	1	1209 ha	5 %
Sols podzoliques	4	3	3	2	1	3	337 ha	1 %
(Para)tourbe	0	0	0	0	0	0	122 ha	0 %

## FORÊT FEUILLUE IRRÉGULIÈRE

Contexte	Bois	Carbone	Inond	Sédi	NO3-P	Tourisme	Surface	% surface
Bons sols	4	6	6	6	6	5	9582 ha	37 %
Fortes pentes	3	4	5	4	5	4	1016 ha	4 %
Sols alluviaux	4	6	6	6	6	6	904 ha	4 %
Sols humides	2	3	5	5	5	5	597 ha	2 %
Sols podzoliques	3	4	5	5	3	5	493 ha	2 %
(Para)tourbe	0	4	4	5	5	4	47 ha	0 %

## PESSIÈRE IRRÉGULIÈRE « PRO SILVA » (NON DRAINÉE)

Contexte	Bois	Carbone	Inond	Sédi	NO3-P	Tourisme
Bons sols	6	6	6	6	5	4
Fortes pentes	4	4	5	4	4	3
Sols alluviaux	6	6	6	4	3	2
Sols humides	3	3	5	5	4	3
Sols podzoliques	4	4	5	5	2	4
(Para)tourbe	0	4	4	5	4	0

FIGURE 7.5 – Exemple de matrice des services écosystémiques (Maebe et al., 2018).

tion des particules fines... Les critères ont été évalués en utilisant des données d'inventaires (volume sur pied et production par type de peuplement), des enquêtes auprès des utilisateurs (préférences), des modèles existants (stock de carbone, abondance des pollinisateurs), la littérature (qualité de l'eau) et des dires d'experts. Durant un atelier participatif, les parties prenantes étaient invitées par groupe à exprimer leur opinion concernant la provision de chaque service écosystémique et à leur allouer un poids (Figure 7.6). Le logiciel PROMETHEE a ensuite été utilisé pour classer les différents itinéraires de gestion. La méthode demande de définir la matrice de performance des services pour chaque alternative de gestion, d'identifier si les critères doivent être maximisés ou minimisés, définir le poids de chaque critère et de définir la fonction de normalisation (fonction de préférence) de chaque critère (Figure 7.7). Les alternatives de gestion ont ainsi pu être classées pour chaque groupe d'utilisateurs et une analyse de sensibilité a été réalisée pour tester l'importance de différents choix méthodologiques (poids et fonction de préférence).

## **7.4 Evaluation des arbres d'agrément**

Les arbres d'agrément peuvent faire l'objet de différentes expertises (ex. vente, préjudice) menant à l'évaluation de leur valeur. Leur valeur n'est néanmoins pas marchande et dépend le plus souvent de critères subjectifs. Les arbres d'agrément peuvent être considérés bénéfiques à l'environnement (réduction de l'érosion, ombre et fraîcheur, réduction du bruit) et favorables à l'équilibre physique et psychologique des individus (esthétique, diversité de forme et de couleur, culturel)...

La valeur d'un arbre d'agrément évolue au cours du temps en fonction de son âge, ses dimensions, son développement, les investissements et entretiens effectués. Cette valeur est assez faible lorsque l'arbre est jeune et maximale lorsque l'arbre est en pleine maturité. L'arbre perd progressivement de la valeur lorsqu'il rentre dans un phase de dépérissement (Bary-Lenger and Nebout, 2002).

### **7.4.1 Coût de remplacement**

La méthode la plus simple et la plus directe pour évaluer la valeur d'un arbre d'agrément consiste à déterminer sa valeur de remplace-

SERVICES OFFERTS PAR LA FORÊT		Entourez votre OPINION	IMPORTANCE : Distribuez les 100 points
	Sol de qualité protégé de l'érosion et des inondations	  	
	Protection de la faune et de la flore	  	
	Emblème d'un patrimoine culturel collectif (identité régionale à travers des espèces ou paysages emblématiques...)	  	
	Chasse d'animaux sauvages	  	
	Récolte de plantes (jonquilles, ail des ours...), champignons (chanterelles...), animaux (insectes, plumes...)	  	
	Environnement naturel à proximité de lieux de vie (école, bureau, domicile)	  	
	Observation de la nature, activités de découvertes (classes vertes...) et de recherche, source d'inspiration (film...)	  	
	Eau de qualité en quantité suffisante	  	
	Limitation du changement climatique, climat local (la forêt garde une atmosphère plus fraîche l'été...) et air pur	  	
	Pêche (poissons et crustacés)	  	
	Activités quotidiennes et de loisirs de plein air (course à pied, promenade...)	  	
	Bois d'œuvre (ameublement, charpente...), d'industrie (papier...) et de chauffage	  	

FIGURE 7.6 – Questionnaire utilisé pour calculer les poids à attribuer à chaque critère (Service écosystémique). Les parties prenantes étaient également interrogées afin d'identifier si les critères devaient être maximisés ou minimisés.

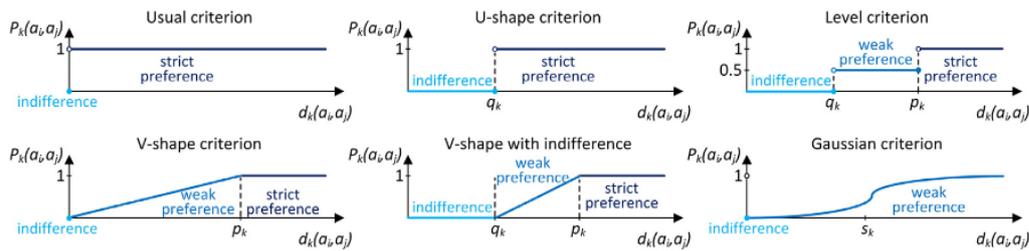


FIGURE 7.7 – Illustration des fonctions de préférence disponibles avec PROMETHE (Ziemba, 2021). Certaines fonctions nécessitent d'identifier des seuils de préférence ( $Q$ ,  $P$ ) qui peuvent être obtenus via des questionnaires (ex. en ajoutant une colonne au questionnaire de la figure 7.6).

ment, c'est-à-dire le coût de l'achat d'un plant aux caractéristiques similaires chez un pépiniériste additionné des coûts liés à sa plantation (entretien et garantie compris). Cette méthode n'est néanmoins applicable que lorsque les arbres sont de taille (circonférence < 25 cm et hauteur < 5 m) et d'âge limités.

#### 7.4.2 Évaluation au travers d'un score multi-critère

La méthode conventionnelle, surtout pour les arbres âgés, consiste à évaluer différents critères, à noter chacun de ces critères, d'aggréger ces scores pour obtenir un score total qui est ensuite converti en une valeur monétaire.

A ce titre, différentes listes de critères et différents systèmes de notation et d'évaluation monétaire on vu le jour. Ils font l'objet d'un consensus entre experts et autorités judiciaires. Différents critères et procédures sont cependant utilisés même parfois entre régions proches (Wallonie et France).

A titre d'exemple, l'estimation de la valeur d'agrément des arbres fait l'objet d'une circulaire (numéro 2260) en Région wallonne. La valeur d'un arbre d'agrément est estimée à l'aide de la formule suivante :

$$V = \frac{B \times S \times S' \times C \times P \times St \times Pa}{40,3399}$$

où

- $B$  la valeur de base de l'arbre qui dépend de sa circonférence (en cm), sa hauteur totale (en m) et le rayon moyen du houppier (en m) :  $B = \frac{C^2}{4\pi} \times H \times RHoup$  ;
- $S$  et  $S'$ , les coefficients de sorte et de silhouette dont la valeur dépend de l'espèce, sa rareté, sa vitesse de croissance, sa durée de vie, ses caractéristiques esthétiques... Des valeurs de  $S'$  sont renseignées pour chaque espèce dans la circulaire ;
- $C$ , un coefficient de condition variant de 0,1 (arbre dépérisant) à 1 (arbre sans défaut visible) ;
- $P$ , un coefficient dépendant du type de plantation variant de 0,4 (plantation en grand groupe) à 1 (arbre solitaire) ;
- $St$ , un coefficient de situation qui dépend de l'environnement variant de 0,5 (espace rural boisé) à 1 (espace urbain avec bâti dense) ;
- $Pa$ , un coefficient permettant de tenir compte de la valeur patrimoniale et culturelle variant de 1 (arbre sans valeur patrimoniale particulière) à 1,5 (arbre classé comme monument ou comme site)

Cette méthode est le résultat d'un consensus entre experts et autorités publique. Elle est forcément biaisée. Elle conduit à une valeur toujours positive alors que certains arbres doivent être abattus quand le coût de leur maintien (ex. risque de chute) dépasse les bénéfices de son maintien.

La circulaire prévoit en outre différents cas particuliers ainsi que le calcul d'indemnités pour des préjudices de différentes natures.

Plusieurs autres méthodes (applicables par exemple en France ou au Québec) sont décrites et illustrées par Bary-Lenger and Nebout (2002).

## 7.5 Résumé

- Les forêts délivrent une multitude de biens et services. La prise en compte de cette complexité est indispensable pour comprendre les choix de gestion et les guider.
- Des méthodes spécifiques ont été développées pour évaluer la valeur de services et biens non marchands. Certaines de ces méthodes reposent sur l'évaluation du consentement maximum à payer (notion de surplus).
- Différentes méthodes ont été développées pour synthétiser l'impact de stratégies de gestion en tenant compte des mul-

tiples répercussions possibles (Analyse coût-bénéfice, Front de Pareto, Matrice des ES, Analyse multi-critères).

- Dans certains cas, l'évaluation repose sur des simplifications nécessaires étant donné la complexité du problème. Certaines simplifications font l'objet de consensus comme pour l'estimation de la valeur des arbres d'agrément.
- Ces considérations doivent mener à une grande prudence lorsque l'on compare différentes sylvicultures (multitude de services à considérer et multitude de variantes d'une même sylviculture). Ces outils permettent surtout d'objectiver avec une certaine transparence les enjeux afin de fournir des éléments pour nourrir un débat.

## 7.6 Exercice

### 7.6.1 Exercice 1

Critiquez l'extrait suivant de l'audition d'un expert forestier réalisée dans le cadre d'une commission parlementaire en Wallonie qui souhaitait évaluer s'il fallait promouvoir la sylviculture irrégulière par rapport à la sylviculture régulière.

“Concernant la sylviculture de type régulière [...] j'ai repris les données de base [F=4500 €, plantation 1 100 €/ha, élagage, prix par classe de circonférence, révolution = 60 ans, productivité classe 2<sup>4</sup>, loyer de chasse 50 €/ha]. On obtient un taux interne de rentabilité de 3,66 %.”

“Dans le cadre d'une sylviculture irrégulière [... loyer de chasse = 50 €, dépressage, élagage, décote de la qualité des arbres, de l'absence de mise à blanc, de l'hétérogénéité des lots ...]. On a tenu compte d'un [...] accroissement] de 8 m<sup>3</sup>/ha/an. [...] On obtient dans ce cas-ci un TIR de 2,06 %.”

### 7.6.2 Exercice 2

Pour des raisons légales (assurances, délits, etc.), il est parfois nécessaire de calculer la valeur d'un arbre remarquable ou d'intérêt paysager. La Région wallonne a ainsi mis au point une méthodologie de calcul expliquée dans la circulaire 2660. Grâce à cette dernière,

---

4. qui correspond à un accroissement moyen de 15 m<sup>3</sup>/ha/an

estimez la valeur d'agrément du Ginkgo biloba situé dans le parc de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech. Cet arbre à une circonférence de 380 cm, une hauteur de 23.9 m et un rayon de couronne de 6.4 m.

# Bibliographie

- AFI, 2020. Valorisation de la base AFI. Technical Report. Association Futaie Irrégulière.
- Amacher, G.S., Ollikainen, M., Koskela, E., et al., 2009. Economics of forest resources. Mit Press Cambridge.
- Bary-Lenger, A., Evrad, R., Gathy, P., Kimus, J., 2002. L'expertise et la gestion financière des propriétés forestières. Vaillant-carmanne ed., Liège.
- Bary-Lenger, A., Nebout, J.P., 2002. Evaluation financière des arbres d'agrément et de production : en ville, à la campagne, en forêt. Tec et doc ed., Paris.
- Bruciamacchie, M., Bailly, M., Schneider, J.B., 2008. La valeur potentielle comme outil d'aide à la gestion des peuplements irréguliers. Forêt Wallonne 93, 34–43.
- Claessens, H., 2019. Cours d'expertise sylvicole. Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège.
- Commissariat Général du Plan, 2020. Révision du taux d'actualisation des investissements publics. Technical Report. Rapport du groupe d'experts présidés par Daniel Lebèque. Paris.
- Davies, O., Kerr, G., 2015. Comparing the costs and revenues of transformation to continuous cover forestry for sitka spruce in great britain. Forests 6, 2424–2449. doi :[10.3390/f6072424](https://doi.org/10.3390/f6072424).
- Gollier, C., 2010. Ecological discounting. Journal of Economic Theory 145, 812–829.
- Gosselin, M., Costa, S., Paillet, Y., Chevalier, H., 2011. Actualisation en forêt : pour quelles raisons et à quel taux? Revue Forestiere Francaise LXIII, 445–455. doi :[10.4267/2042/45828](https://doi.org/10.4267/2042/45828).

- Guiller, C., Prévot, C., 2019. Première vente sur parc à grumes de Wallonie. *Forêt.Nature* 150, 53–58.
- Haig, M., 2014. *The human*. Canongate Books.
- Hanewinkel, M., Frutig, F., Lemm, R., 2014. Economic performance of uneven-aged forests analysed with annuities. *Forestry* 87, 49–60. doi :[10.1093/forestry/cpt043](https://doi.org/10.1093/forestry/cpt043).
- Hanley, N., Barbier, E.B., 2009. *Pricing nature, cost-benefit analysis and environmental policy*. Edward Elgar Publishing.
- Jourez, B., de Wauters, P., Bienfait, O., 2010. Le classement des bois feuillus sur pied. *Silva Belgica* 117, 1–12.
- Lafond, V., Cordonnier, T., Mao, Z., Courbaud, B., 2017. Trade-offs and synergies between ecosystem services in uneven-aged mountain forests : evidences using pareto fronts. *European journal of forest research* 136, 997–1012.
- Ligot, G., Gheysen, T., Perin, J., Candaele, R., de Coligny, F., Licoppe, A., Lejeune, P., 2023. From the simulation of forest plantation dynamics to the quantification of bark-stripping damage by ungulates. *European Journal of Forest Research* doi :[10.1007/s10342-023-01565-w](https://doi.org/10.1007/s10342-023-01565-w).
- Maebe, L., 2024. *Pairing the concepts of ecosystem services and resilience to navigate in the current crises toward sustainability*. Ph.D. thesis. ULiège, Gembloux Agro-Bio Tech.
- Maebe, L., Claessens, H., Dufrière, M., 2018. Première charte forestière : comment l'approche des services écosystémiques informe une gestion multifonctionnelle. *Forêt.Nature* 148. URL : <https://orbi.uliege.be/handle/2268/228229>.
- Möhring, B., 2001. The German struggle between the 'Bodenreinertragslehre' (land rent theory) and 'Waldreinertragslehre' (theory of the highest revenue) belongs to the past — but what is left? *Forest Policy and Economics* 2, 195–201. doi :[10.1016/S1389-9341\(01\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(01)00049-1).
- Möhring, B., Rüping, U., 2008. A concept for the calculation of financial losses when changing the forest management strategy. *Forest Policy and Economics* 10, 98–107. doi :[10.1016/j.forpol.2007.06.004](https://doi.org/10.1016/j.forpol.2007.06.004).

- Perin, J., Hébert, J., Lejeune, P., Claessens, H., 2016. De nouvelles normes sylvicoles pour les futaies pures équiennes d'épicéa et de douglas en appui à la gestion de la forêt publique en Wallonie. *Forêt.Nature* 139.
- Price, C., 1989. *The theory and application of forest economics*. Basil blackwell ltd ed., Basil Blackwell Oxford, Oxford, UK.
- Price, C., 2014. Temporal aspects in forest economics, in : *Handbook of Forest Resource Economics*. Routledge, pp. 50–67.
- Price, C., Price, M., 2008. Cost–benefit analysis of continuous cover forestry, in : *Scandinavian Forest Economics : Proceedings of the Biennial Meeting of the Scandinavian Society of Forest Economics*, pp. 36–65.
- Sanchez, C., Hebert, J., Rondeux, J., 2004. Analyse des prix de ventes des bois en forêts publiques. *Forêt Wallonne* 73, 30–34.
- Sen, A.K., 1957. A note on Timbergen on the optimum rate of saving. *Economic journal* 67, 745–748.
- Terreaux, J.P., 1990. *Principes de gestion des investissements en forêt*. Ph.D. thesis. Toulouse 1.
- Ziamba, P., 2021. Implementation of the new easy approach to fuzzy multi-criteria decision aid in the field of management. *MethodsX* 8, 101344. doi :[10.1016/j.mex.2021.101344](https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101344).