

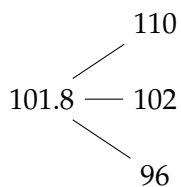
# APT & Modèles Multifacteurs

Patrick Hénaff

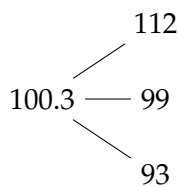
Version: 11 Feb 2025

## 1 Prix d'Etat et Valorisation par Arbitrage

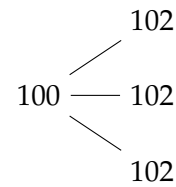
Soit une économie dotée de 2 actifs risqués et d'un taux sans risque. Pour l'année à venir, l'incertitude sur les rendements est modélisée par un arbre à trois branches, numérotées de 1 (haut) à trois (bas). On ignore les probabilités associées à chaque scénario. Les prix des actifs A et B sont respectivement 102 € et 104 € tandis que le prix de l'actif sans risque R est arbitrairement fixé à 100 €, pour un taux sans risque de 2%.



Titre A

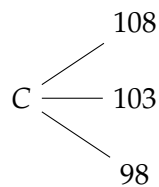


Titre B



Actif sans risque R

Quelle devrait être la valeur du titre C, dont les valeurs attendues selon les trois scénarios sont:



On constitue un portefeuille formé des titres A, B et R qui a la même valeur à terme que C. Les poids des titres dans ce portefeuille sont obtenus en résolvant:

```
M = matrix(c(110,102,96,112,99,93,102,102,102), nrow=3)
b = matrix(c(108,103,98))
P.0 = matrix(c(101.8, 100.3,100), nrow=3)
w = solve(M, b)
P.C = t(w) %*% P.0
rownames(w) <- c('A', 'B', 'R')
```

$$\begin{bmatrix} 110 & 112 & 102 \\ 102 & 99 & 102 \\ 96 & 93 & 102 \end{bmatrix} W = \begin{bmatrix} 108 \\ 103 \\ 98 \end{bmatrix}$$

Soit,

$$W = \begin{bmatrix} 1.17 \\ -0.33 \\ 0.17 \end{bmatrix}$$

et donc un prix

$$\begin{aligned} P_C &= W^T \begin{bmatrix} 101.8 \\ 100.3 \\ 100 \end{bmatrix} \\ &= 102 \end{aligned}$$

Pour simplifier les calculs, il est utile de s'intéresser à des actifs élémentaires qui ont un rendement nul dans tous les scénarios sauf un: soit  $E_i, i = 1, \dots, 3$  un tel actif, ayant par convention une valeur de 1 à terme dans le scénario  $i$ . Calculons le vecteur  $P$  des prix de ces trois actifs. En reprenant la même logique que précédemment,

```
b = diag(3)
w = solve(M, b)
P.E = t(w) %*% P.0
```

on obtient:

$$P_E = \begin{bmatrix} 0.29 \\ 0.61 \\ 0.08 \end{bmatrix}$$

C'est à dire que l'actif  $E_1$ , prenant la valeur 1 dans le scénario 1 et 0 dans les deux autres a une valeur de 0.29. Les actifs  $E_i$  sont appelés actifs d'Arrow-Debreu, et les prix  $P_{E_i}$  sont les prix d'états associés. Notons que pour éviter une opportunité d'arbitrage,  $P_{E_i} \geq 0$ . En appliquant ces prix d'état à l'actif sans risque, on observe que

$$(1+r) \sum_i P_{E_i} = 1$$

Posons  $\pi_i = (1+r)P_{E_i}$ , et considérons un actif quelconque  $Z$  de le prix  $Z_0$ , valant à terme  $Z_i$  si le scénario  $i$  se réalise. Par définition des prix d'états, on a

$$Z_0 = \sum_i P_{E_i} Z_i$$

ou bien,

$$Z_0 = \frac{1}{1+r} \sum_i \pi_i Z_i$$

avec  $\sum_i \pi_i = 1, \pi_i \geq 0$ . On peut interpréter  $\pi_i$  comme une probabilité associée à l'état  $i$ . Ainsi, la valeur de l'actif  $Z$  est l'espérance de valeur future sous la probabilité  $\pi$ , actualisée à la date du jour. Un agent qui valoriserait ainsi les actifs, en considérant uniquement l'espérance de valeur future, serait neutre par rapport au risque, et les pseudo-probabilités  $\pi$  sont de ce fait nommées "probabilités risque-neutre". Dans ce monde "risque-neutre", tous les actifs ont le même taux de rendement, et c'est le taux sans risque.

## 2 Le Modèle APT

On suppose que le rendement non-anticipé d'un actif est une fonction linéaire de facteurs de risque indépendants:

$$R_{it} = E_i + \sum_{k=1}^K \beta_{ik} F_{kt} + \epsilon_{it} \quad (1)$$

Avec:

$R_{it}$  Rendement observé

$E_i$  Rendement anticipé (espérance de rendement)

$F_{kt}$  Rendement non-anticipé du facteur  $k$

### 2.1 Version simplifiée

Commençons par une version simplifiée de (1), sans terme d'erreur. Avec  $N$  actifs risqués et  $K$  facteurs, la relation s'écrit:

$$r = \mu + Bf \quad (2)$$

ou  $r$  est une variable aléatoire de dimension  $N$ ,  $B$  est une matrice  $N \times K$ ,  $E(f_i) = 0$ ,  $\text{Cov}(f) = \Phi$ . Constituons un portefeuille d'actifs risqués de poids  $w \in R^N$  tel que  $w$  est orthogonal aux colonnes de  $B$ . Le rendement de ce portefeuille est:

$$r_w = (1 - w^T \mathbf{1}) r_0 + w^T r \quad (3)$$

$$E(r_w) = r_0 + E(w^T (r - r_0 \mathbf{1})) \quad (4)$$

$$= r_0 + w^T (\mu - r_0 \mathbf{1}) \quad (5)$$

$$\text{Var}(r_w) = \text{Cov}(w^T B f, w^T B f) \quad (6)$$

$$= w^T B \text{Cov}(f, f) B^T w \quad (7)$$

$$= 0 \quad (8)$$

Puisque le portefeuille  $w$  est sans risque, son rendement est le taux sans risque:  $w^T \mu = r_0$ , ou  $w^T (\mu - r_0 \mathbf{1}) = 0$ . Ce qui implique que  $(\mu - r_0 \mathbf{1})$  est dans le sous-espace généré par les colonnes de  $B$ . Il existe donc un vecteur  $\lambda$  tel que:

$$(\mu - r_0 \mathbf{1}) = B \lambda \quad (9)$$

Pour revenir à la notation initiale, on a établi que l'espérance d'excès de rendement d'un actif risqué est une fonction linéaire des primes de risque  $\lambda$  associées aux facteurs de risque:

$$E_i - r_0 = \sum_k \beta_{ik} \lambda_k \quad (10)$$

où  $\beta_{ik}$  est l'exposition du titre  $i$  au facteur  $k$ .

## 2.2 Modèle avec terme d'erreur

On considère maintenant le modèle complet, avec un terme d'erreur  $\epsilon$ :

$$r = \mu + B f + \epsilon \quad (11)$$

avec  $\text{Cov}(\epsilon) = \sigma^2 I$ ,  $E(\epsilon) = 0$ ,  $\text{Cov}(\epsilon, f) = 0$ .

On procède comme précédemment en construisant un portefeuille diversifié composé des  $N$  actifs, orthogonal aux colonnes de  $B$ .

Soit  $a = \max |w_i|, i = 1, \dots, N$ . Avec un portefeuille suffisamment diversifié,  $a$  est  $O(1/N)$ . Calculons la variance du rendement de ce portefeuille moyen:

$$\text{Var}(w^T r) = \text{Var}(w^T B f + w^T \epsilon) \quad (12)$$

$$= \text{Var}\left(\sum_i w_i \epsilon_i\right) \quad (13)$$

$$\leq N a^2 \sigma^2 \quad (14)$$

Comme  $a \sim O(1/N)$ , pour  $N$  grand  $\text{Var}(w^T r) \sim 0$  et le portefeuille  $w$  est essentiellement sans risque. Donc:

$$w^T r = w^T \mu \quad (15)$$

$$= r_0 \quad (16)$$

Par un raisonnement similaire à celui de la section précédente, on déduit que dans ce modèle également, l'espérance d'excès de rendement est une fonction linéaire des primes de risque associées aux facteurs:

$$\mu - r_0 \mathbf{1} = B\lambda \quad (17)$$

Pour résumer, le modèle APT postule que le rendement des actifs risqués est une fonction linéaire d'un nombre limité de facteurs de risque:

$$R_{it} = E_i + \sum_{k=1}^K \beta_{ik} F_{kt} + \epsilon_{it} \quad (18)$$

et on en déduit que l'espérance de l'excès de rendement de ces actifs risqués est uniquement une fonction des prime de risques des facteurs auxquels le titre est exposé:

$$E_i - r_0 = \sum_k \beta_{ik} (r_{F_k}) \quad (19)$$

### 3 Mise en oeuvre

Ce résultat a inspiré de nombreuses stratégies de mise en oeuvre; on peut même dire qu'il a donné naissance à une industrie à part entière. Deux grandes catégories de modèles se dégagent: les modèles implicites, et les modèles explicites.

#### 3.1 Modèles factoriels implicites ou statistiques

Soit  $\hat{\Sigma}$  l'estimation de la matrice de covariance et  $X_k, k = 1, \dots, K$  les vecteurs propres retenus. La série temporelle de réalisation du facteur  $k$  est:

$$\hat{f}_{kt} = X_k^T R_t$$

La projection de chaque titre  $i$  sur les facteurs est obtenue par regression linéaire, en utilisant la série temporelle du rendement du titre et les series temporelles de réalisation des facteurs:

$$R_{it} = \alpha_i + \beta_i^T \hat{f}_t + \epsilon_{it}$$

Finalement, on peut calculer le prix du risque  $\lambda_k$  de chaque facteur en estimant la regression longitudinale

$$\bar{r}_i = \lambda_0 + \lambda_1 \hat{\beta}_{i1} + \lambda_K \hat{\beta}_{iK} + u_i$$

Ayant retenu  $K$  facteurs, la covariance des rendements est obtenue par:

$$\hat{\Sigma} = B \Sigma_F B^T + \Sigma_\epsilon$$

### 3.2 Modèles factoriels explicites à facteurs macroéconomiques (Chen, Roll et Ross - 1986)

Les facteurs de risques sont définis *a priori*, par exemple:

- Croissance de la production industrielle non-anticipée
- Variation de l'anticipation d'inflation
- Taux d'inflation non-anticipé
- Ecart de taux (Baa - AAA) non anticipé
- Variation de l'écart (T Bond - T Bill) non anticipé
- Rendement d'un indice de marché

1. Pour chacun de ces facteurs, on calcule la valeur non-anticipée du facteur:

$$\tilde{f}_{kt} = f_{kt} - E(f_{kt})_{t-1}$$

2. Pour chaque actif risqué  $i$ , estimer les expositions  $\beta_{ik}$  aux facteurs en estimant l'équation de régression

$$r_{it} = a_i + \beta_{i1} \tilde{f}_{1t} + \dots + \beta_{iK} \tilde{f}_{Kt} + \epsilon_{it}$$

3. Calculer le prix du risque  $\lambda_k$  de chaque facteur en estimant la regression longitudinale

$$\bar{r}_i = \lambda_0 + \lambda_1 \hat{\beta}_{i1} + \lambda_K \hat{\beta}_{iK} + u_i$$

### 3.3 Modèles factoriels explicites à facteurs microéconomiques

On trouve dans cette rubrique deux types de modèles, qui illustrent la flexibilité de l'approche factorielle.

### 3.3.1 Modèle de type "BARRA"

Selon cette approche, les  $\beta$  sont des données observables, spécifiques aux titres: capitalisation, catégorie industrielle, etc.) Voir le document "Risk Model Handbook" pour plus de détails. Ces  $\beta$  étant connus, on calcule pour chaque date le rendement du facteur  $f_t$  par la régression

$$R_t = \beta f_t + \epsilon_t$$

Par exemple, si le facteur est le secteur industriel, les  $\beta$  sont de la forme

$$\begin{aligned} \beta_{ik} &= 1 \text{ si le titre } i \text{ appartient à la catégorie } k \\ &= 0 \text{ autrement} \end{aligned}$$

### 3.3.2 Modèle Fama-French

Ce modèle est également largement utilisé dans l'industrie. Le l'excès de rendement est fonction de trois facteurs:

$$r_{i,t} = \alpha_i + \beta_{i,M} R_{M,t} + \beta_{i,SMB} SMB_t + \beta_{i,HML} HML_t + e_{i,t}$$

avec:

$r_i$  Excédent de rendement, titre  $i$

$R_M$  Excédent de rendement, marché

$SMB$  "Small Minus Big": Facteur Capitalisation

$HML$  "High Minus Low": Facteur Valorisation

Ici, contrairement à l'approche BARRA, les rendements des facteurs sont connus, et les  $\beta$  sont estimés par regression, en utilisant les séries de rendement des titres.

Les facteurs sont des portefeuilles à coût nul définis comme suit: on utilise deux caractéristiques pour définir une segmentation des titres:

		Valeur Comptable/Marché	
		Faible	Forte
Capitalisation	Faible	SG	SV
	Forte	LG	LV

Cette segmentation permet de construire deux facteurs:

$SMB$  "Small Minus Big": Facteur Capitalisation

$$\frac{1}{2}(SG - SV) - \frac{1}{2}(LG - LV)$$

*HML* "High Minus Low": Facteur Valorisation

$$\frac{1}{2}(SV + LV) - \frac{1}{2}(SG + LG)$$

On ajoute souvent au modèle original un quatrième facteur:

$$R_{i,t} = \alpha_i + \beta_{i,M}R_{M,t} + \beta_{i,SMB}SMB_t + \beta_{i,HML}HML_t + \beta_{i,UMD}R_{UMD,t} + \dots + e_{i,t}$$

UMD (Up Minus Down): rendement d'un portefeuille de titres ayant eu les rendements les plus élevés sur les 2-12 derniers mois, moins le rendement d'un portefeuille de titres ayant eu les rendements les moins élevés sur la même période.

Il y a de multiples tentatives de justification de ce facteur:

1. Justifications inspirées par la finance comportementale. On peut citer, entre autres, le "disposition effect" de Shefrin et Statman (1985), Frazzini (2006): Les investisseurs ont tendance à vendre les investissements profitables tôt, et conserver les perdants dans l'espoir de revenir au point mort. Il en résulte que les prix ont tendance à sous-réagir aux nouvelles, créant une inertie artificielle.
2. L'excès de rendement lié au momentum pourrait simplement représenter la rémunération du risque pris. Une de ces justifications serait que les investisseurs dont les titres ont fortement augmenté sont plus exposés au risque de liquidité que ceux dont les titres ont baissé.

L'article de T. Moskowitz "Explanations for the Momentum Premium" présente une revue détaillée des théories justifiant le facteur "momentum".

## 4 Applications des modèles multi-factoriels

1. Estimation de la matrice de covariance

Si le rendement des titres est généré par un processus multi factoriel

$$R_t = \alpha + \beta^T F_t + \epsilon_t$$

alors la covariance des rendements est

$$\Sigma = \beta^T \Phi \beta + \Sigma_\epsilon$$

2. Estimation des espérances de rendements  $E(R)$
3. Expression de "points de vue" sur le rendement des facteurs et construction de portefeuilles privilégiant ces "points de vue".
4. Ex-post, attribution de la performance des portefeuilles. à partir d'estimations de  $\alpha$ ,  $\beta$ , et des espérances de rendement des facteurs