

Regime-Based Strategic Asset Allocation

Étude Empirique Complète

Yves-Marie Saliou, Yessine Manai, Milos Gajic et Issam Fradi

Master en Finance Quantitative

Université Paris Dauphine

January 29, 2026

Abstract

Ce rapport présente une étude détaillée de l'allocation stratégique d'actifs basée sur les régimes macroéconomiques, en s'appuyant sur le cadre théorique développé par Bouyé et Teiletche (2025). Nous implémentons et analysons en profondeur quatre portefeuilles basés sur les régimes (rg-PWA, rg-EWA, rg-ERC, rg-PRC) et les comparons à cinq approches traditionnelles (MVO, EWA, ERC, 60/40, EPO). L'étude couvre la période 1973-2023 et utilise sept classes d'actifs représentatives d'un univers multi-actifs typique. Nos résultats confirment que les méthodologies basées sur les régimes, particulièrement rg-ERC, offrent une robustesse supérieure face aux chocs économiques adverses tout en maintenant des performances compétitives.

Contents

1	Introduction et Contexte	3
1.1	Motivation de l'Étude	3
1.2	Contribution de Notre Étude	3
2	Approche Théorique : Mélange de Distributions	3
2.1	Modèle Fondamental	3
2.2	Cas Uni-Actif : Implications Analytiques	4
2.3	Ratio de Sharpe Multi-Régime	4
2.4	Extension Multi-Actifs	4
3	Optimisation de Portefeuille sous Régimes	5
3.1	Optimisation Moyenne-Variance (MVO)	5
3.2	Budgétisation du Risque (Risk Budgeting)	5
4	Méthodologies d'Allocation par Régimes	5
4.1	Construction en Deux Étapes	5
4.2	Description Détaillée des Quatre Portefeuilles	6
4.2.1	rg-PWA (Probability Weighted Allocation)	6
4.2.2	rg-EWA (Equally Weighted Allocation)	6
4.2.3	rg-ERC (Equal Risk Contribution)	7

4.2.4	rg-PRC (Probability-weighted Risk Contribution)	7
5	Mise en Œuvre Empirique	7
5.1	Définition des Quatre Régimes Macroéconomiques	7
5.2	Univers d'Actifs et Traitement des Données	8
5.3	Comportement des Actifs selon les Régimes	9
6	Portefeuilles de Régimes Individuels : Analyse Détaillée	10
6.1	Composition des Portefeuilles Optimaux par Régime	10
6.1.1	Portefeuille Overheating	10
6.1.2	Portefeuille Goldilocks	10
6.1.3	Portefeuille Stagflation	11
6.1.4	Portefeuille Downturn	12
6.2	Synthèse Comparative des Portefeuilles Individuels	12
7	Résultats Empiriques et Backtesting	12
7.1	Performance In-Sample (1973-2023)	12
7.2	Performance Out-of-Sample (1998-2023)	13
8	Limites	14
9	Extension : Modèle à Changements de Régimes Markoviens	15
9.0.1	Spécification du Modèle HMM, Structure Générale	15
9.0.2	Hypothèses Fondamentales	15
9.1	Algorithmes d'Estimation et d'Inférence	15
9.1.1	Filtre de Hamilton (Forward Algorithm)	15
9.1.2	Lissage Forward-Backward	16
9.1.3	Algorithme EM (Baum-Welch)	16
9.1.4	Décodage Viterbi	17
9.2	Intégration dans l'Allocation de Portefeuille	17
9.2.1	Labellisation Économique des États	17
9.2.2	Estimation des Moments d'Actifs par Régime	17
9.3	Procédure de Backtest Out-of-Sample	18
9.4	Comparaison HMM vs Approche Originale	18
9.5	Contributions Principales	18
9.6	Considérations Pratiques	18
9.6.1	Choix du Nombre d'États	18
9.6.2	Robustesse de l'Estimation	19
9.6.3	Coûts Computationnels	19
10	Autre Extensions possibles	19
11	Conclusion	19
11.1	Synthèse des Résultats	19
11.2	Perspective	20
A	Annexes	21
A.1	Figures Complémentaires	21

1 Introduction et Contexte

1.1 Motivation de l'Étude

Le papier de **Bouyé et Teiletche (2025)** traite de l'intégration des régimes macroéconomiques dans l'allocation stratégique d'actifs (SAA). Contrairement à l'approche tactique (TAA) qui cherche à anticiper les changements de régimes à court terme, cette étude adopte une perspective de long terme fondamentalement différente.

Les auteurs partent du constat empirique que les régimes économiques (récessions, inflation, croissance) sont les principaux moteurs des économies et expliquent des caractéristiques saillantes des rendements financiers observées dans les données historiques :

- **Hétéroscédasticité** : Changements substantiels de volatilité entre régimes (souvent $> 50\%$ d'augmentation en période de stress)
- **Corrélations dynamiques** : Modification de la structure de dépendance entre actifs selon le régime
- **Skewness négative** : Asymétrie dans la distribution des rendements
- **Queues épaisses** : Présence de rendements extrêmes plus fréquents qu'une distribution normale

1.2 Contribution de Notre Étude

Notre travail se distingue par :

1. Une implémentation complète de tous les portefeuilles proposés par Bouyé et Teiletche
2. Une analyse détaillée de la composition et du comportement de chaque portefeuille de régime individuel
3. Une méthodologie robuste de traitement des données avec reconstruction de séries historiques (TIPS, commodités)
4. Une validation empirique sur plus de 50 ans avec analyse des périodes de stress spécifiques

2 Approche Théorique : Mélange de Distributions

2.1 Modèle Fondamental

L'innovation centrale consiste à modéliser les régimes comme un mélange de distributions (mixture of distributions). Formellement, chaque observation du vecteur $\mathbf{R}_t$ (de dimension $K \times 1$) des rendements excédentaires des actifs est tirée d'un mélange de N distributions avec des proportions respectives $(p_1, \dots, p_N)$ satisfaisant $\sum_{i=1}^N p_i = 1$.

Hypothèse clé : Dans ce cadre stratégique, ces proportions p_i correspondent aux probabilités économiques inconditionnelles de long terme, considérées comme constantes. Cette simplification par rapport aux modèles de Markov-switching permet d'obtenir des résultats analytiques plus simple.

2.2 Cas Uni-Actif : Implications Analytiques

Pour un actif unique ($K = 1$), l'espérance μ et la variance σ^2 multi-régimes sont définies par :

$$\mu = \sum_{i=1}^N p_i \mu_i \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \underbrace{\sum_{i=1}^N p_i \sigma_i^2}_{\text{Variance intra-régime}} + \underbrace{\sum_{i=1}^N p_i (\mu_i - \mu)^2}_{\text{Variance inter-régime}} \quad (2)$$

Propriété fondamentale : Contrairement à la moyenne qui est une simple moyenne pondérée, la variance multi-régime incorpore un terme additionnel reflétant la dispersion des rendements moyens entre les régimes. Cette composante inter-régime est toujours positive dès lors que les rendements varient entre régimes, impliquant que :

$$\sigma^2 \geq \sum_{i=1}^N p_i \sigma_i^2 \quad (3)$$

avec égalité si et seulement si $\mu_i = \mu$ pour tout i .

2.3 Ratio de Sharpe Multi-Régime

Une dérivation importante (détaillée dans l'Appendix A du papier) établit que le ratio de Sharpe multi-régime $S = \mu/\sigma$ peut s'exprimer comme :

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^N p_i \frac{\sigma_i^2}{\sigma^2} (1 + S_i^2) - 1} \quad (4)$$

où $S_i = \mu_i/\sigma_i$ est le ratio de Sharpe du régime i . Cette expression révèle une relation complexe entre le Sharpe ratio global et ceux des régimes individuels, dépendant à la fois des probabilités p_i et du risque relatif de chaque régime σ_i^2/σ^2 . En effet, le Sharpe ratio multi-régime peut être inférieur à la moyenne pondérée des Sharpe ratios individuels si les régimes moins volatils (faible σ_i^2/σ^2) ont également un Sharpe ratio élevé et une probabilité importante. On a pas une relation stricte comme dans le cas précédent.

2.4 Extension Multi-Actifs

Pour un portefeuille de K actifs défini par un vecteur de poids $\mathbf{w}$, la matrice de covariance globale $\mathbf{\Omega}$ est obtenue par :

$$\mathbf{\Omega} = \sum_{i=1}^N p_i (\mathbf{\Omega}_i + (\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu})(\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu})^T) \quad (5)$$

Cette matrice se décompose naturellement en deux composantes :

$$\mathbf{\Omega} = \underbrace{\sum_{i=1}^N p_i \mathbf{\Omega}_i}_{\mathbf{\Omega}_{\text{Intra}}} + \underbrace{\sum_{i=1}^N p_i (\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu})(\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu})^T}_{\mathbf{\Omega}_{\text{Inter}}} \quad (6)$$

- Ω_{Intra} : Covariance intra-régime, moyenne pondérée des matrices de covariance de chaque régime
- Ω_{Inter} : Covariance inter-régime, déviations croisées des rendements attendus entre régimes

Cas particuliers notables :

- Si $\mu_i = \mu$ pour tout i : $\Omega_{\text{Inter}} = \mathbf{0}$ et $\Omega = \Omega_{\text{Intra}}$
- Si $\Omega_i = \bar{\Omega}$ pour tout i : $\Omega = \bar{\Omega} + \Omega_{\text{Inter}}$

3 Optimisation de Portefeuille sous Régimes

3.1 Optimisation Moyenne-Variance (MVO)

Soit $\mathbf{w}_{\text{MVO}}$ le portefeuille optimal multi-régime et $\mathbf{w}_{\text{MVO},i}$ le portefeuille optimal pour le régime i . En supposant une aversion au risque γ constante, l'article démontre la relation analytique suivante :

$$\mathbf{w}_{\text{MVO}} = \Omega^{-1} \sum_{i=1}^N p_i \Omega_i \mathbf{w}_{\text{MVO},i} \quad (7)$$

Interprétation : Le portefeuille optimal global est une moyenne pondérée des portefeuilles optimaux par régime, où chaque poids est modulé par le ratio $\Omega^{-1} \Omega_i$. Ce terme capture l'ajustement nécessaire pour tenir compte de la variation du risque entre régimes.

3.2 Budgétisation du Risque (Risk Budgeting)

La volatilité totale σ_p d'un portefeuille peut être décomposée en contributions individuelles. En présence de régimes, cette décomposition s'étend naturellement :

$$\sigma_p = \sum_{i=1}^N p_i RC_i. \quad (8)$$

où RC_i représente la contribution au risque du régime i , définie comme :

$$RC_i = \frac{\sum_{j=1}^K w_j RC_{ij}}{\sigma_p} \quad (9)$$

avec $RC_{ij} = [(\Omega_i + (\mu_i - \mu)(\mu_i - \mu)^T) \mathbf{w}]_j$.

Cette linéarité permet de définir des stratégies comme le **rg-ERC** qui cherche à égaliser l'impact de chaque scénario économique sur le risque total, plutôt que d'égaliser seulement le risque entre classes d'actifs.

4 Méthodologies d'Allocation par Régimes

4.1 Construction en Deux Étapes

Toutes les méthodologies basées sur les régimes suivent un processus en deux étapes :

Étape 1 : Construction des portefeuilles de régimes individuels

- Pour chaque régime $i = 1, \dots, N$:
- Estimation de μ_i et Ω_i à partir des données historiques
- Optimisation MVO avec contraintes (long-only, pas de levier)
- Obtention de $\mathbf{w}_{\text{MVO},i}$

Étape 2 : Agrégation des portefeuilles individuels

- Combinaison selon la méthodologie choisie
- Obtention du portefeuille final $\mathbf{w}_{\text{rg}}$

4.2 Description Détaillée des Quatre Portefeuilles

4.2.1 rg-PWA (Probability Weighted Allocation)

Principe : Allocation basée sur les probabilités de long terme.

$$\mathbf{w}_{\text{rg-PWA}} = \sum_{i=1}^N p_i \mathbf{w}_{\text{MVO},i} \quad (10)$$

Philosophie : Ce portefeuille cherche à performer "en moyenne" sur l'ensemble des régimes, en pondérant chaque portefeuille de régime par sa fréquence d'occurrence historique. Il est intuitivement aligné avec une vision fréquentiste des régimes économiques.

Avantages :

- Simple à implémenter, et facilement interprétable, c'est probablement la première idée qui nous vient à l'esprit lorsque l'on estime les probabilités de chaque régime.

Limites :

- Sensible à l'estimation des probabilités, en effet ce portefeuille est optimale si l'histoire des régimes se répète, aussi il peut surpondérer des régimes étant donnée que se base sur des données historiques

4.2.2 rg-EWA (Equally Weighted Allocation)

Principe : Équipondération des portefeuilles de régimes.

$$\mathbf{w}_{\text{rg-EWA}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{w}_{\text{MVO},i} \quad (11)$$

Philosophie : Stratégie agnostique vis-à-vis des probabilités. L'investisseur reconnaît sa capacité à identifier les régimes pertinents mais évite de parier sur leurs probabilités relatives.

Avantages :

- Robuste à l'erreur d'estimation des probabilités car on donne un poids égal aux régimes rares, qui peut s'avérer bénéfiques car ces événements sont souvent des chocs très élevés. Il est particulièrement adapté quand les régimes futurs pourraient différer des fréquences historiques

Limites :

- Ignore l'information contenue dans les probabilités historique et peut surpondérer des régimes très rares

4.2.3 rg-ERC (Equal Risk Contribution)

Principe : Égalisation des contributions au risque de chaque régime.

Le portefeuille $\mathbf{w}_{\text{rg-ERC}}$ est obtenu en minimisant :

$$f_{\text{ERC}}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\theta_i RC_i}{\sigma_p} - \frac{1}{N} \right)^2 \quad (12)$$

où $\boldsymbol{\theta}$ est le vecteur de poids donnés aux portefeuilles individuels et RC_i la contribution marginale au risque du portefeuille de régime i .

Philosophie : Extension de l'approche "risk parity" à la dimension des régimes. Plutôt que d'égaliser le risque entre classes d'actifs, on égalise le risque provenant de chaque scénario économique.

Avantages :

- Robustesse supérieure face aux chocs, diversification "par construction" à travers les régimes économiques et ne nécessite pas d'estimation des probabilités

Limites :

- Plus complexe à implémenter (optimisation numérique) et moins facile à interpréter.

4.2.4 rg-PRC (Probability-weighted Risk Contribution)

Principe : Alignement des budgets de risque sur les probabilités.

Le portefeuille $\mathbf{w}_{\text{rg-PRC}}$ est obtenu en minimisant :

$$f_{\text{PRC}}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\theta_i RC_i}{\sigma_p} - p_i \right)^2 \quad (13)$$

Philosophie : Hybride entre rg-PWA et rg-ERC. On cherche à ce que la contribution au risque de chaque régime soit proportionnelle à sa probabilité d'occurrence. C'est l'équivalent en termes de risque de ce que rg-PWA fait en termes de capital.

Avantages :

- Équilibre entre considérations de probabilité et de risque et proche du MVO et utilise donc toute l'information disponible (probabilités + structure de risque)

Limites :

- Dépendance aux deux sources d'estimation (probabilités et matrices de covariance) et complexe à implémenter

5 Mise en Œuvre Empirique

5.1 Définition des Quatre Régimes Macroéconomiques

Pour illustrer ce cadre théorique, nous identifions quatre régimes basés sur la combinaison de la croissance économique et de l'inflation pour l'économie américaine sur la période 1973-2023.

Indicateurs utilisés :

- **Croissance** : Dates de récession NBER
 - Haute croissance : périodes d'expansion (87%)
 - Basse croissance : périodes de récession (13%)
- **Inflation** : CPI (Consumer Price Index)
 - Haute inflation : $\text{CPI} > 5\%$ YoY ET surprise positive (16%)
 - Basse inflation : autres périodes (84%)

Les quatre régimes :

1. **Overheating (Surchauffe)** : Croissance élevée + Inflation élevée
 - Probabilité : 11,1%
 - Caractéristiques : Économie en surchauffe, risques inflationnistes
 - Période type : Années 1970, 2021-2022
2. **Goldilocks (Boucle d'or)** : Croissance élevée + Inflation faible
 - Probabilité : 75,6%
 - Caractéristiques : Régime "idéal", croissance sans inflation
 - Période type : Années 1990-2000, 2010-2019
3. **Stagflation** : Faible croissance + Inflation élevée
 - Probabilité : 5,1%
 - Caractéristiques : Pire scénario, croissance faible avec inflation
 - Période type : Chocs pétroliers 1970s, début 1980s
4. **Downturn (Récession)** : Faible croissance + Inflation faible
 - Probabilité : 8,2%
 - Caractéristiques : Récession déflationniste
 - Période type : 2008-2009, 2020

5.2 Univers d'Actifs et Traitement des Données

Sept classes d'actifs (février 1973 - décembre 2023, 611 rendements mensuelles) :

- **EQU** : S&P 500 Total Return Index (reconstruit)
- **GOV** : Bloomberg U.S. Treasury Index
- **CRED** : Bloomberg U.S. Corporate Investment Grade Index
- **TIPS** : Bloomberg U.S. TIPS Index (reconstruit pré-1997)
- **REITs** : FTSE NAREIT All Equity REITs Index
- **GOLD** : Gold Prices

- **COMMx** : Bloomberg ex-Gold Commodity Index (reconstruit pré-1998)

Méthodologie de reconstruction :

Pour la période antérieure à 1997, les rendements des Treasury Inflation-Protected Securities (TIPS) sont reconstruits de manière synthétique en suivant la méthodologie proposée par Swinkels. Cette approche consiste à approximer les rendements d'une obligation indexée sur l'inflation à partir des taux nominaux et des anticipations d'inflation.

Les anticipations d'inflation sont mesurées à l'aide d'un proxy de type moyenne mobile centrée de l'inflation annuelle :

$$\hat{\pi}_t = \frac{1}{3} (\pi_{t-12} + \pi_t + \pi_{t+12}). \quad (14)$$

Le taux réel implicite est alors défini comme la différence entre le taux nominal à 3 ans et l'inflation anticipée :

$$y_t^{real} = y_t^{nom} - \hat{\pi}_t. \quad (15)$$

Le rendement réel mensuel est approché par une décomposition de premier ordre fondée sur la durée :

$$r_t^{real} = \frac{y_{t-1}^{real}}{12} - D_{t-1} \cdot \Delta y_t^{real}, \quad (16)$$

où D_{t-1} désigne la durée de Macaulay et $\Delta y_t^{real} = y_t^{real} - y_{t-1}^{real}$.

Le rendement total du TIPS synthétique est obtenu en ajoutant l'inflation mensuelle réalisée :

$$r_t^{TIPS} = r_t^{real} + \pi_t^m, \quad (17)$$

avec $\pi_t^m = \frac{CPI_t}{CPI_{t-1}} - 1$.

Pour COMMx (pré-1998), nous utilisons un modèle de régression :

$$r_{BCOM,t} = \alpha + \beta \cdot r_{GOLD,t} + \epsilon_t \quad (18)$$

où $r_{COMMx,t} = \hat{\epsilon}_t$ est le rendement résiduel.

5.3 Comportement des Actifs selon les Régimes

L'analyse des données historiques révèle des patterns distinctifs :

Rendements moyens annualisés par régime :

- **Goldilocks** : Meilleur environnement pour EQU (14,7%) et REITs (15,10%)
- **Downturn** : Meilleur pour GOV (12,3%) et CRED (11,7%)
- **Overheating** : Meilleur pour COMMx (20,3%) et GOLD (25,3%)
- **Stagflation** : GOLD surperforme (33,0%), TIPS (17,7%)

Volatilités :

- Augmentation substantielle (> 50%) en Stagflation et Downturn
- EQU : 12,8% (Goldilocks) → 20,3% (Stagflation)
- REITs : 13,8% (Goldilocks) → 34,0% (Downturn)

Corrélations :

- Plus élevées en période de Downturn (fuite vers la qualité)
- Forte variation pour actifs sensibles à l'inflation (TIPS, COMMx, REITs)
- Stabilité relative au sein du fixed income (GOV-CRED)

6 Portefeuilles de Régimes Individuels : Analyse Détaillée

6.1 Composition des Portefeuilles Optimaux par Régime

Les portefeuilles MVO long-only pour chaque régime révèlent des allocations distinctives :

6.1.1 Portefeuille Overheating

Composition :

- COMMx : 38,2%
- GOLD : 33,3%
- REITs : 28,5%

Concentration sur les actifs protégeant contre l'inflation. Les commodités et l'or bénéficient directement de la pression inflationniste, tandis que les REITs offrent une protection partielle via l'indexation des loyers.

Performance dans son régime :

- Rendement : 19,6% (annualisé)
- Volatilité : 13,2%
- Sharpe ratio : 1,12

Performance multi-régime :

- Rendement : 7,2%
- Volatilité : 11,7%
- Sharpe ratio : 0,20

Interprétation : Le Sharpe ratio chute drastiquement hors de son régime cible, confirmant le manque de robustesse d'une allocation trop spécialisée.

6.1.2 Portefeuille Goldilocks

Composition :

- CRED : 49,7%
- EQU : 26,9%
- REITs : 17,8%
- COMMx : 0,0% contrairement au papier(1.4%)

Le portefeuille le plus diversifié, reflétant l'environnement favorable où la plupart des actifs performant bien. La surpondération du crédit capture le portage attrayant en période de croissance stable sans stress.

Performance dans son régime :

- Rendement : 11,0%
- Volatilité : 6,6%
- Sharpe ratio : 0,92

Performance multi-régime :

- Rendement : 9,1%
- Volatilité : 8,4%
- Sharpe ratio : 0,50 (le meilleur des quatre)

Interprétation : Robustesse relative due à (1) la forte probabilité du régime (75,6%) et (2) la diversification intrinsèque du portefeuille.

6.1.3 Portefeuille Stagflation

Composition :

- TIPS : 58,2%
- GOLD : 41,8%

Focus pur sur la protection inflationniste. Les TIPS offrent une protection directe via l'indexation du principal, tandis que l'or a historiquement surperformé en période de stagflation (rendement de 29,3% dans ce régime).

Performance dans son régime :

- Rendement : 24,1%
- Volatilité : 19,5%
- Sharpe ratio : 0,98

Performance multi-régime :

- Rendement : 7,0%
- Volatilité : 10,8%
- Sharpe ratio : 0,19 (le plus faible)

Interprétation : Excellente performance dans son régime cible mais faible robustesse, justifiant la nécessité d'une approche multi-régimes.

6.1.4 Portefeuille Downturn

Composition :

- GOV : 98.9%

Allocation corner extrême. Les obligations d'État offrent le meilleur rendement ajusté du risque en récession (12,3% de rendement, Sharpe de 0,79), bénéficiant de la baisse des taux directeurs.

Performance dans son régime :

- Rendement : 12,3%
- Volatilité : 7,5%
- Sharpe ratio : 0,99

Performance multi-régime :

- Rendement : 6,3%
- Volatilité : 5,2% (le plus faible)
- Sharpe ratio : 0,28

Interprétation : Portefeuille le plus défensif mais manque d'upside en période de croissance.

6.2 Synthèse Comparative des Portefeuilles Individuels

Observations clés :

1. **Diversification variable :** De 1 actif (Downturn) à 4 actifs (Goldilocks)
2. **Concentration élevée :** Aucun portefeuille n'investit dans tous les actifs
3. **Spécialisation forte :** Chaque actif apparaît dans au plus 2 régimes
4. **Dégradation hors-régime :** Sharpe ratios chutent de 50-75% en multi-régime

Cette analyse confirme que les portefeuilles de régimes individuels sont trop spécialisés pour être détenus seuls sur le long terme, motivant leur agrégation intelligente.

7 Résultats Empiriques et Backtesting

7.1 Performance In-Sample (1973-2023)

Rendements et Sharpe Ratios :

- Meilleur rendement : 60/40 (9,4%) suivi de rg-PWA (8,5%)
- Meilleur Sharpe : rg-PRC (0,49) suivi de rg-PWA (0,49) et MVO (0,47)

Métriques de risque :

- **Maximum drawdown** : MVO (14,1%) < rg-ERC (15,2%) < rg-EWA (17,7%)
- **Skewness** : MVO le seul positif
- **Worst month** : EPO (-7,4%) vs MVO (-5,1%)

Stress tests (rendements durant les crises) :

- **Oct 1987** : EPO (+0,8%)
- **Aug 1998** : MVO (-0,8%)
- **Oct 2008** : MVO (-5,1%)
- **Mar 2020** : MVO (-0,8%)

7.2 Performance Out-of-Sample (1998-2023)

Protocole :

- Fenêtre glissante expansive (rolling window)
- Réestimation mensuelle de tous les paramètres
- Prise en compte du lag de publication des données macro (2 mois)
- Utilisation de la Sahm rule pour détecter les récessions en temps réel, elle repose sur un seul chiffre : le taux de chômage. Elle stipule qu'une récession a commencé lorsque la moyenne mobile sur trois mois du taux de chômage national augmente de 0,50 point de pourcentage ou plus par rapport à son minimum des 12 mois précédents. Dans ce papier les chercheurs ont opté pour une barrière à 0.35 plutôt que 0.5, cela permet d'avoir de meilleurs résultats.

Résultats clés :

- **Sharpe ratios** : rg-PWA et MVO (0,52)
- **Maximum drawdown** : rg-PRC (23,0%)
- **Calmar ratio** : rg-PRC (0,25)

Certainty Equivalent Return (CER) :

Pour un investisseur avec aversion au risque $\gamma = 10$:

- rg-PWA et rg-PRC : +0,6% vs MVO (les meilleurs)
- rg-ERC : +0,4% vs MVO
- 60/40 : -0,4% vs MVO

Conclusion out-of-sample : Les approches basées sur les régimes dominant quasiment tous MVO. rg-PWA et rg-PRC offrent le meilleur compromis rendement-risque pour les investisseurs averses au risque.

8 Limites

1. Délai de publication des données macroéconomiques. Une limite majeure réside dans le caractère tardif des statistiques macroéconomiques. L'indice des prix à la consommation (CPI) est publié avec un décalage d'environ un mois, tandis que les dates de récession définies par le NBER ne sont disponibles qu'avec un retard substantiel, compris entre quatre et vingt-et-un mois. Ce manque de réactivité réduit la capacité de détection en temps réel des régimes économiques. Une solution consiste à recourir à des indicateurs avancés ou quasi temps réel, tels que la *Sahm Rule* ou des indices conjoncturels avancés.

2. Besoin de profondeur historique des données. L'estimation fiable des régimes macroéconomiques rares, comme la stagflation — dont la fréquence historique est estimée à environ 5,1% — requiert une profondeur temporelle importante. En pratique, cela impose de disposer de plus de cinquante années de données homogènes et fiables. Cette contrainte limite fortement l'applicabilité de l'approche aux marchés émergents, ainsi qu'aux classes d'actifs privés pour lesquelles l'historique est insuffisant ou fragmenté.

3. Hypothèse de stabilité des régimes. L'analyse repose implicitement sur l'hypothèse de stationnarité des distributions associées à chaque régime macroéconomique. Or, cette hypothèse peut être remise en cause par des transformations structurelles de long terme, telles que la mondialisation, l'évolution des cadres de politique monétaire ou les changements institutionnels. Ces dynamiques peuvent altérer la nature même des régimes observés et en modifier les propriétés statistiques au cours du temps.

Disponibilité et cohérence des données empiriques. Une difficulté supplémentaire a concerné l'accès aux données exactes utilisées dans le papier de recherche de référence. En particulier, pour l'or, nous nous appuyions initialement sur un indice Bloomberg, dont l'historique ne débute qu'en 1975. Cette limitation temporelle introduisait un biais significatif dans l'estimation des rendements de long terme et compromettait la cohérence de l'analyse historique. Afin de pallier ce problème, nous avons dû changer de source de données et recourir à la base fournie par <https://www.macrotrends.net/1333/historical-gold-prices-100-year-chart>, qui offre un historique étendu remontant jusqu'en 1973. Ce changement n'est toutefois pas sans conséquence, dans la mesure où ces données servent également de référence pour la construction du facteur *CommoExGold*, soulevant ainsi des enjeux de comparabilité et de cohérence méthodologique entre les différentes séries utilisées.

Un problème analogue s'est posé pour l'indice *S&P 500 Total Return*, dont les données historiques ne sont disponibles qu'à partir de 1989. Cette contrainte limitait fortement la possibilité d'une analyse de long terme cohérente avec le cadre du papier de recherche. Afin de prolonger la série, nous avons procédé à une approximation en utilisant l'indice *S&P 500* classique, auquel nous avons réintégré les dividendes, ces derniers étant disponibles jusqu'en 1973. Pour assurer la continuité entre les deux séries, l'indice reconstruit a été rebasé à un niveau de 370 en 1989, correspondant à la valeur observée de l'indice *S&P 500 Total Return* cette année-là. Cette méthode permet d'étendre l'horizon temporel de l'analyse tout en préservant une cohérence raisonnable entre les séries reconstruites et les données observées. Cela ajoute quand même des possibilités d'erreurs sur la réplification exacte d'où nos différents résultats qui sont légèrement différents de celui du papier.

Enfin, aucune indication explicite n'est fournie dans le papier de recherche concernant le taux d'intérêt sans risque utilisé, alors même que celui-ci joue un rôle déterminant dans le calcul des ratios de Sharpe. Ce choix méthodologique peut en effet influencer significativement les résultats empiriques. Bien que le taux sans risque ne soit pas mentionné,

son utilisation apparaît implicite au regard des performances rapportées dans l'article, suggérant qu'il n'est pas fixé de manière arbitraire mais repose sur une série observable et cohérente avec la période étudiée. Il convient donc de l'identifier et de le déterminer de manière rigoureuse.

Dans cette optique, nous avons retenu la série **FEDFUNDS** issue de la base de données FRED de la Réserve fédérale. Cette série correspond au taux effectif des *Federal Funds*, c'est-à-dire le taux d'intérêt au jour le jour auquel les institutions financières américaines se prêtent leurs réserves excédentaires sur le marché interbancaire. En raison de son caractère quasi sans risque, de sa liquidité et de sa disponibilité sur une longue période historique, le taux **FEDFUNDS** est couramment utilisé dans la littérature académique comme proxy du taux sans risque à court terme. Ce choix apparaît ainsi comme le plus cohérent avec les données et les résultats présentés dans le papier de référence.

9 Extension : Modèle à Changements de Régimes Markoviens

9.0.1 Spécification du Modèle HMM, Structure Générale

Soit $\{x_t\}_{t=1}^T$ une séquence d'indicateurs macroéconomiques de dimension $D = 3$ (croissance, inflation, surprise d'inflation). Le modèle HMM est caractérisé par le triplet $\lambda = (\boldsymbol{\pi}, \mathbf{A}, \boldsymbol{\theta})$ où :

- $\boldsymbol{\pi} = (\pi_1, \dots, \pi_K)$: distribution initiale sur les états ($\sum_k \pi_k = 1$)
- $\mathbf{A} = (a_{ij})$: matrice de transition avec $a_{ij} = \Pr(s_t = j \mid s_{t-1} = i)$
- $\boldsymbol{\theta} = \{(\boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Sigma}_k)\}_{k=1}^K$: paramètres d'émission gaussiens par état

9.0.2 Hypothèses Fondamentales

Dynamique Markovienne : Les états latents $s_t \in \{1, 2, 3, 4\}$ suivent une chaîne de Markov d'ordre 1 :

$$\Pr(s_t = j \mid s_{t-1} = i, s_{t-2}, \dots) = a_{ij} \quad (19)$$

La matrice de transition capture la **persistance** des régimes. Pour des régimes macroéconomiques, nous attendons $a_{ii} \approx 0.90$, correspondant à une durée moyenne de 10 mois par régime :

$$\mathbb{E}[\text{durée en état } i] = \frac{1}{1 - a_{ii}} \quad (20)$$

Émissions gaussiennes : Conditionnellement à l'état $s_t = k$, les indicateurs suivent :

$$x_t \mid (s_t = k) \sim \mathcal{N}_D(\boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Sigma}_k) \quad (21)$$

9.1 Algorithmes d'Estimation et d'Inférence

9.1.1 Filtre de Hamilton (Forward Algorithm)

Le filtre de Hamilton calcule les probabilités *filtrées* en temps réel :

$$\alpha_t(k) = \Pr(s_t = k \mid x_{1:t}) \quad (22)$$

L'algorithme procède par récursion :

Prédiction (Chapman-Kolmogorov) :

$$\text{pred}_t(k) = \sum_{i=1}^K a_{ik} \cdot \alpha_{t-1}(i) \quad (23)$$

Mise à jour Bayésienne :

$$\alpha_t(k) = \frac{f(x_t | s_t = k) \cdot \text{pred}_t(k)}{\sum_{j=1}^K f(x_t | s_t = j) \cdot \text{pred}_t(j)} \quad (24)$$

Complexité : $O(T \times K^2)$ – linéaire en T , à comparer avec $O(K^T)$ pour l'énumération naïve.

Interprétation économique : $\alpha_t(k)$ représente l'information disponible en temps réel à la date t . C'est l'information pertinente pour l'allocation *ex ante*, n'utilisant pas d'observations futures.

9.1.2 Lissage Forward-Backward

Les probabilités *lissées* utilisent toute l'information de l'échantillon :

$$\gamma_t(k) = \Pr(s_t = k | x_{1:T}) = \frac{\alpha_t(k) \cdot \beta_t(k)}{\sum_j \alpha_t(j) \cdot \beta_t(j)} \quad (25)$$

où $\beta_t(k) = \Pr(x_{t+1:T} | s_t = k)$ est calculé par récursion backward.

Utilisation : Les $\gamma_t(k)$ sont utilisées pour :

- La datation *ex post* des régimes (analyse historique)
- L'algorithme EM pour estimer les paramètres
- L'estimation des moments d'actifs par régime

9.1.3 Algorithme EM (Baum-Welch)

L'estimation des paramètres se fait par maximisation de la vraisemblance via EM :

Étape E : Calculer les statistiques suffisantes $\{\gamma_t(k)\}$ et $\{\xi_t(i, j)\}$ via forward-backward.

Étape M : Mise à jour analytique des paramètres :

Distribution initiale :

$$\hat{\pi}_k = \gamma_1(k) \quad (26)$$

Matrice de transition :

$$\hat{a}_{ij} = \frac{\sum_{t=2}^T \xi_t(i, j)}{\sum_{t=2}^T \gamma_{t-1}(i)} \quad (27)$$

Moyennes des émissions :

$$\hat{\mu}_k = \frac{\sum_{t=1}^T \gamma_t(k) \cdot x_t}{\sum_{t=1}^T \gamma_t(k)} \quad (28)$$

Covariances des émissions :

$$\hat{\Sigma}_k = \frac{\sum_{t=1}^T \gamma_t(k) \cdot (x_t - \hat{\mu}_k)(x_t - \hat{\mu}_k)^\top}{\sum_{t=1}^T \gamma_t(k)} \quad (29)$$

Convergence : L'EM garantit que la log-vraisemblance augmente à chaque itération jusqu'à convergence vers un optimum local.

Initialisation : Nous utilisons une stratégie informée :

- Distribution initiale uniforme : $\pi_k = 1/K$
- Matrice de transition diagonale dominante : $a_{ii} = 0.90$, $a_{ij} = 0.10/(K - 1)$ pour $i \neq j$
- Moyennes réparties sur les quantiles de l'inflation
- Covariances initialisées à la covariance empirique globale

9.1.4 Décodage Viterbi

L'algorithme de Viterbi trouve la séquence d'états la plus probable globalement :

$$\hat{s}_{1:T} = \arg \max_{s_{1:T}} \Pr(s_{1:T} \mid x_{1:T}) \quad (30)$$

Par programmation dynamique :

$$\delta_1(j) = \log \pi_j + \log f(x_1 \mid s_1 = j) \quad (31)$$

$$\delta_t(j) = \max_i [\delta_{t-1}(i) + \log a_{ij}] + \log f(x_t \mid s_t = j) \quad (32)$$

Puis reconstruction du chemin par backtracking.

9.2 Intégration dans l'Allocation de Portefeuille

9.2.1 Labellisation Économique des États

Les états numériques $\{1, 2, 3, 4\}$ sont associés aux régimes économiques via les moyennes estimées μ_k :

Régime	Croissance	Inflation
Overheating	$\mu_k^{(g)} > 0$	$\mu_k^{(i)} > 0$
Goldilocks	$\mu_k^{(g)} > 0$	$\mu_k^{(i)} < 0$
Stagflation	$\mu_k^{(g)} < 0$	$\mu_k^{(i)} > 0$
Downturn	$\mu_k^{(g)} < 0$	$\mu_k^{(i)} < 0$

Table 1: Critères de labellisation des états HMM

9.2.2 Estimation des Moments d'Actifs par Régime

Pour chaque régime k , les rendements moyens et la covariance des actifs sont estimés en pondérant par les probabilités lissées :

$$\hat{\mu}_k^{(\text{actifs})} = \frac{\sum_{t=1}^T \gamma_t(k) \cdot r_t}{\sum_{t=1}^T \gamma_t(k)} \quad (33)$$

$$\hat{\Sigma}_k^{(\text{actifs})} = \frac{\sum_{t=1}^T \gamma_t(k) \cdot (r_t - \hat{\mu}_k)(r_t - \hat{\mu}_k)^\top}{\sum_{t=1}^T \gamma_t(k)} \quad (34)$$

Ces paramètres sont ensuite annualisés ($\times 12$) pour l'optimisation.

9.3 Procédure de Backtest Out-of-Sample

Le backtest utilise une fenêtre glissante expansive pour éviter le biais de look-ahead :

[H] [1] $t = t_{\text{OOS}}, \dots, T$ Extraire données d'entraînement : $\{x_1, \dots, x_{t-1}\}, \{r_1, \dots, r_{t-1}\}$
 Estimer HMM : $\hat{\lambda} \leftarrow \text{EM}(x_{1:t-1})$ Calculer probabilités filtrées : α_{t-1} Estimer moments d'actifs par régime (avec γ_t) Optimiser portefeuilles par régime : $\{\mathbf{w}_k^*\}$ Construire stratégies d'agrégation Calculer rendements OOS : $r_t^p = \mathbf{w}_t^\top r_t$

9.4 Comparaison HMM vs Approche Originale

Aspect	B&T 2025 (Original)	Extension HMM
Définition régimes	Seuils fixes (médiane)	Estimation endogène
Transitions	Discontinues, déterministes	Probabilistes, Markoviennes
Incertitude	Non modélisée	Quantifiée ($\alpha_t(k)$)
Persistence	Non modélisée	Capturée (matrice $\mathbf{A}$)
Paramètres	Fixés a priori	Estimés (maximum vraisemblance)

Table 2: Comparaison approche originale vs extension HMM

9.5 Contributions Principales

1. **Modélisation probabiliste** : Le HMM fournit des probabilités continues $\alpha_t(k) \in [0, 1]$, permettant une allocation nuancée reflétant le degré de confiance dans l'identification du régime.
2. **Dynamique temporelle endogène** : La matrice $\mathbf{A}$ capture la persistance naturelle ($a_{ii} \approx 0.90$) et permet d'anticiper les transitions probables, évitant les "faux signaux".
3. **Inférence en temps réel** : Le filtre de Hamilton calcule $\alpha_t(k)$ sans information future, crucial pour l'allocation en temps réel et le backtest non-biaisé.
4. **Robustesse à l'incertitude** : Les stratégies pondérées (rg-PWA, rg-PRC) intègrent naturellement l'incertitude plutôt que de "parier" sur un régime unique.
5. **Cadre unifié** : L'algorithme EM fournit simultanément les paramètres du modèle, les probabilités de régime et la vraisemblance pour la sélection de modèle.

9.6 Considérations Pratiques

9.6.1 Choix du Nombre d'États

$K = 4$ est motivé par la correspondance avec les 4 quadrants (Growth $\times$ Inflation). Des critères formels (BIC, AIC) peuvent être utilisés :

$$\text{BIC} = -2 \log \mathcal{L} + p \log T \quad (35)$$

où $p = (K - 1) + K(K - 1) + KD + K \frac{D(D+1)}{2}$ est le nombre de paramètres.

9.6.2 Robustesse de l'Estimation

- **Régularisation** : $\Sigma_k^{\text{reg}} = \Sigma_k + \epsilon \mathbf{I}_D$ avec $\epsilon = 10^{-6}$
- **Multiples initialisations** : Exécuter l'EM 3-10 fois, conserver la meilleure log-vraisemblance
- **Contraintes** : Imposer $a_{ij} \geq 10^{-4}$ pour garantir l'ergodicité

9.6.3 Coûts Computationnels

- **Par itération EM** : $O(T \times K^2 \times D^3)$ (dominé par les inversions de matrices)
- **Nombre d'itérations** : Typiquement 20-50 pour convergence
- **Optimisation** : Réestimation trimestrielle plutôt que mensuelle, warm start avec paramètres précédents

10 Autre Extensions possibles

1. Approches minimax regret

- Robustesse face à l'incertitude des régimes
- Minimisation du regret maximum entre scénarios

2. Règles de rebalancing adaptatives

- Ajustement dynamique selon les probabilités filtrées
- Hybridation SAA-TAA

11 Conclusion

11.1 Synthèse des Résultats

Cette étude empirique confirme les principaux résultats théoriques de Bouyé et Teiletche (2025) :

1. **Pertinence des régimes** : Les régimes macroéconomiques expliquent une part substantielle de la variation des rendements et du risque des actifs financiers.
2. **Dominance vs MVO traditionnel** : Quasiment tous les portefeuilles basés sur les régimes génèrent un CER positif vs MVO pour les investisseurs averses au risque ($\gamma = 10$).
3. Finalement l'extension HMM enrichit significativement le cadre de Bouyé et Teiletche (2025) en apportant une rigueur probabiliste et une flexibilité opérationnelle. En modélisant explicitement l'incertitude sur les régimes et leur dynamique de transition, cette approche permet de construire des allocations plus robustes et adaptées à la réalité des marchés.

11.2 Perspective

L'approche par régimes macroéconomiques représente une alternative crédible et robuste aux méthodologies d'allocation stratégique traditionnelles. En exploitant explicitement la structure économique sous-jacente, elle offre un cadre intuitif pour la diversification qui va au-delà de la simple diversification entre classes d'actifs. La performance empirique supérieure de rg-ERC, particulièrement durant les périodes de stress, en fait un candidat sérieux pour l'allocation de long terme des portefeuilles institutionnels.

Remerciements

Nous remercions les professeurs du Master en Finance Quantitative de l'Université Paris Dauphine pour leurs enseignements et leurs conseils précieux. Nous remercions également Eric Bouyé et Jérôme Teiletche pour leur article qui a permis cette étude.

References

- [1] Bouyé, E., & Teiletche, J. (2025). Regime-Based Strategic Asset Allocation. *Financial Analysts Journal*, forthcoming.
- [2] Hamilton, J. D. (1989). A New Approach to the Economic Analysis of Nonstationary Time Series and the Business Cycle. *Econometrica*, 57(2), 357-384.
- [3] Markowitz, H. (1952). Portfolio Selection. *The Journal of Finance*, 7(1), 77-91.
- [4] Swinkels, L. (2018). Simulating Historical Inflation-Linked Bond Returns. *Journal of Empirical Finance*, 48, 374-389.

A Annexes

A.1 Figures Complémentaires

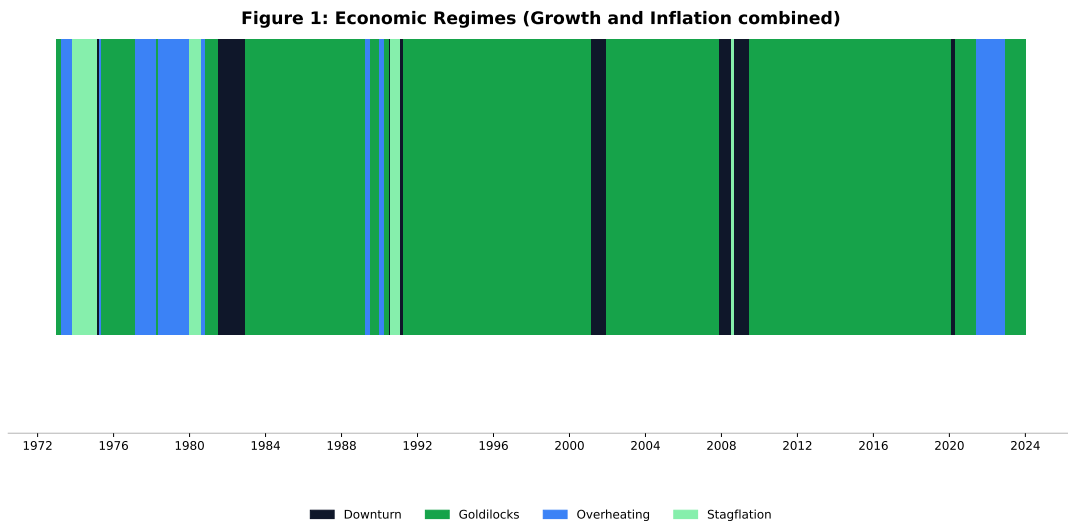


Figure 1: Régimes classiques - Vue d'ensemble

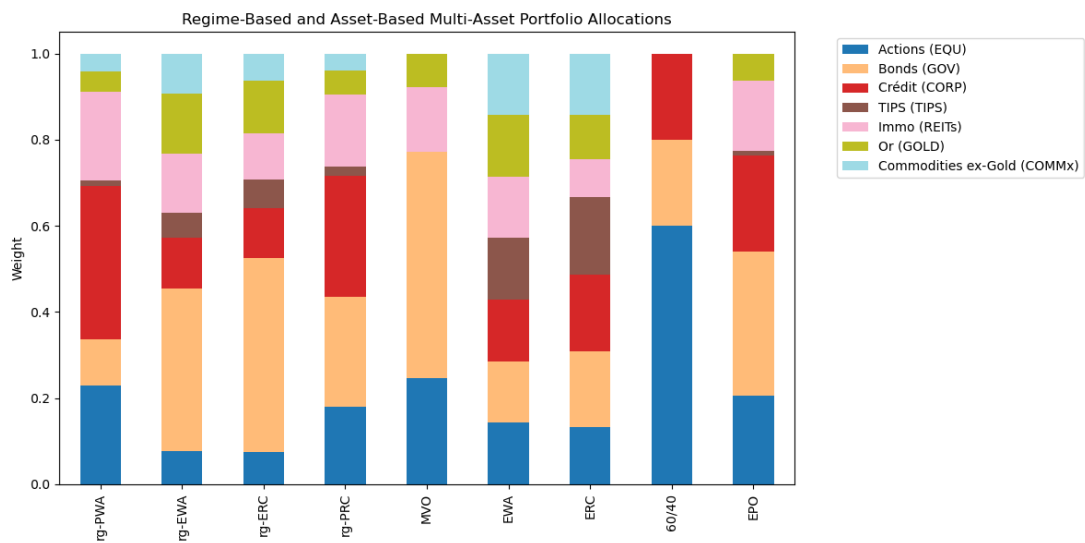


Table 3: Description des portefeuilles (Table 1 Papier)

Portfolio	Allocation Mechanism	Individual-Regime Portfolios Weighting
rg-PWA	Capital-based	Regime-probability (p_i)
rg-EWA	Capital-based	Equal-weight ($1/N$)
rg-ERC	Risk-based	Equal-weight ($1/N$)
rg-PRC	Risk-based	Regime-probability (p_i)

Table 4: Caractéristiques des rendements sur les différents régimes (Table 2 Papier)

Regime	Metric	EQU	GOV	CRED	TIPS	REITs	GOLD	COMMx
Overheating (11.1%)	Average return	6.80	0.80	-1.70	4.70	12.20	25.30	20.30
	Volatility	13.30	5.30	7.80	12.50	17.00	26.90	21.70
	Sharpe ratio	0.01	-1.11	-1.07	-0.16	0.33	0.69	0.63
Goldilocks (75.6%)	Average return	14.70	6.20	8.00	5.50	15.10	3.50	2.80
	Volatility	12.80	4.60	5.50	7.80	13.80	15.70	13.30
	Sharpe ratio	0.83	0.46	0.71	0.18	0.80	-0.04	-0.10
Stagflation (5.1%)	Average return	-3.10	9.80	5.00	17.70	0.60	33.00	-0.80
	Volatility	20.30	7.80	13.40	18.30	23.10	37.70	29.90
	Sharpe ratio	-0.63	0.01	-0.35	0.43	-0.40	0.62	-0.35
Downturn (8.2%)	Average return	-5.90	12.30	11.70	4.70	-6.80	12.20	-24.20
	Volatility	22.70	7.50	12.50	15.00	34.00	22.80	21.50
	Sharpe ratio	-0.54	0.79	0.43	-0.11	-0.39	0.25	-1.42
Full sample (multi-regime)	Average return	11.20	6.30	7.10	6.00	12.30	8.20	2.30
	Volatility	14.40	5.20	7.20	9.90	17.20	19.60	16.60
	Sharpe ratio	0.44	0.28	0.31	0.11	0.43	0.17	-0.15
Probability-weighted	Average return	11.20	6.30	7.10	6.00	12.30	8.20	2.30
	Volatility	14.00	5.10	6.70	9.40	16.20	18.70	15.80
	Sharpe ratio	0.55	0.29	0.44	0.13	0.59	0.10	-0.14

Table 5: Correlation entre les titres dans les régimes (Table 3 Papier)

Assets pair	Overheating	Goldilocks	Stagflation	Downturn	Multi-Reg.	Prob-Wgt
EQU, GOV	0.38	-0.01	0.01	0.01	0.03	0.04
EQU, CORP	0.45	0.23	0.18	0.51	0.31	0.28
EQU, TIPS	0.23	0.06	-0.18	0.28	0.09	0.09
EQU, REITs	0.71	0.50	0.72	0.74	0.60	0.55
EQU, GOLD	0.10	-0.02	0.14	0.05	0.02	0.01
EQU, COMMx	-0.01	0.18	-0.21	0.43	0.15	0.16
GOV, CORP	0.92	0.87	0.85	0.60	0.81	0.85
GOV, TIPS	0.84	0.76	0.92	0.66	0.76	0.77
GOV, REITs	0.40	0.13	0.04	0.01	0.11	0.15
GOV, GOLD	0.09	0.08	-0.03	0.29	0.09	0.09
GOV, COMMx	-0.04	-0.12	-0.23	-0.12	-0.14	-0.12
CORP, TIPS	0.80	0.73	0.76	0.72	0.73	0.73
CORP, REITs	0.51	0.33	0.23	0.46	0.36	0.36
CORP, GOLD	-0.02	0.12	0.05	0.31	0.10	0.12
CORP, COMMx	0.00	0.01	-0.19	0.34	0.01	0.02
TIPS, REITs	0.30	0.13	-0.14	0.24	0.14	0.14
TIPS, GOLD	0.09	0.14	0.06	0.45	0.16	0.15
TIPS, COMMx	0.11	0.07	-0.12	0.27	0.08	0.08
REITs, GOLD	0.00	0.09	0.26	0.08	0.08	0.09
REITs, COMMx	-0.06	0.14	-0.18	0.38	0.13	0.12
GOLD, COMMx	0.04	0.20	0.28	0.26	0.19	0.19
Median	0.11	0.13	0.05	0.31	0.13	0.14

Table 6: Composition et caractéristiques des rendements en régime individuel (Table 4 Papier)

	Overheating	Goldilocks	Stagflation	Downturn
Portfolio composition (Weights)				
Actions (EQU)	0.0%	26.9%	0.0%	0.0%
Bonds (GOV)	0.0%	5.6%	0.0%	98.9%
Crédit (CORP)	0.0%	49.7%	0.0%	0.0%
TIPS (TIPS)	0.0%	0.0%	58.2%	0.0%
Immo (REITs)	28.5%	17.8%	0.0%	0.0%
Or (GOLD)	33.3%	0.0%	41.8%	1.1%
Commodities ex-Gold (COMMX)	38.2%	0.0%	0.0%	0.0%
Risk-return metrics in own individual regime				
Average Return	19.6%	11.0%	24.1%	12.3%
Volatility	13.2%	6.6%	19.5%	7.5%
Sharpe ratio	1.12	0.92	0.98	0.99
Multi-regime risk-return metrics				
Average Return	7.2%	9.1%	7.0%	6.3%
Volatility	11.7%	8.4%	10.8%	5.2%
Sharpe ratio	0.20	0.50	0.19	0.28

Table 7: Métriques des rendements par agrégats (Table 5 Papier)

	Regime-Based				Asset-Based / Benchmarks				
	rg-PWA	rg-EWA	rg-ERC	rg-PRC	MVO	EWA	ERC	60/40	EPO
Multi-regime									
Average return	8.5%	7.4%	7.4%	8.2%	7.2%	7.7%	7.2%	9.4%	7.4%
Volatility	7.4%	6.8%	6.2%	6.8%	4.9%	7.3%	6.6%	9.4%	5.6%
Sharpe ratio	0.49	0.37	0.41	0.49	0.47	0.38	0.35	0.48	0.46
TEV vs MVO	4.1%	4.0%	2.8%	3.2%	0.0%	4.5%	3.6%	6.9%	1.3%
Average Returns in Different Regimes									
Overheating	5.4%	9.3%	7.3%	5.2%	3.8%	9.8%	8.2%	3.9%	3.4%
Goldilocks	9.8%	7.1%	7.4%	9.2%	7.5%	8.0%	7.6%	11.7%	8.0%
Stagflation	5.0%	11.8%	10.6%	6.1%	8.4%	8.9%	8.8%	1.1%	8.0%
Downturn	3.4%	4.2%	5.5%	4.5%	8.0%	0.6%	1.6%	1.2%	7.7%
Risk-Adjusted Average Returns in Different Regimes									
Overheating	-0.16	0.32	0.09	-0.20	-0.52	0.38	0.19	-0.30	-0.50
Goldilocks	0.96	0.54	0.66	0.93	0.80	0.67	0.64	0.93	0.83
Stagflation	-0.44	0.18	0.09	-0.36	-0.19	-0.08	-0.10	-0.65	-0.20
Downturn	-0.21	-0.19	-0.08	-0.15	0.22	-0.45	-0.41	-0.33	0.14

Notes: The table reports the in-sample performance metrics of the regime-based and asset-based portfolios.

Risk-free rates used per regime: Overheating: 6.68%, Goldilocks: 4.12%, Stagflation: 9.74%, Downturn: 6.36%.

Table 8: Métriques additionnelles (Table 6 Papier)

	Regime-Based				Asset-Based / Benchmarks				
	rg-PWA	rg-EWA	rg-ERC	rg-PRC	MVO	EWA	ERC	60/40	EPO
Risk Metrics									
Max. drawdown	-26.7%	-17.7%	-15.2%	-22.5%	-14.1%	-26.5%	-22.7%	-33.2%	-15.9%
Skewness	-0.69	-0.42	-0.41	-0.59	0.01	-0.88	-0.75	-0.42	-0.08
Worst month	-13.4%	-12.5%	-10.8%	-11.9%	-5.1%	-14.9%	-12.7%	-11.4%	-7.4%
Stress Tests									
October 1987	-2.8%	0.5%	0.6%	-1.8%	0.9%	-1.3%	0.1%	-5.6%	0.8%
August 1998	-4.6%	-3.0%	-2.4%	-3.7%	-0.8%	-4.7%	-3.7%	-8.0%	-1.2%
October 2008	-13.4%	-12.5%	-10.8%	-11.9%	-5.1%	-14.9%	-12.7%	-11.4%	-7.4%
March 2020	-8.7%	-5.1%	-4.4%	-7.2%	-0.8%	-7.7%	-6.7%	-8.2%	-3.3%

Table 9: Métriques des rendements sur l'échantillon de test (Table 7 Papier)

	Regime-Based				Asset-Based				
	rg-PWA	rg-EWA	rg-ERC	rg-PRC	MVO	EWA	ERC	60/40	EPO
Average return	5.8%	6.2%	6.1%	5.7%	5.5%	6.1%	5.6%	7.0%	5.7%
Volatility	7.4%	8.7%	8.1%	7.3%	7.8%	7.9%	7.2%	9.9%	7.6%
Sharpe ratio	0.52	0.48	0.50	0.51	0.46	0.52	0.50	0.50	0.49
Maximum drawdown	-23.9%	-29.2%	-27.2%	-23.0%	-25.4%	-26.5%	-25.1%	-33.2%	-25.3%
Calmar ratio	0.24	0.21	0.22	0.25	0.22	0.23	0.22	0.21	0.23
Skewness	-1.38	-1.50	-1.47	-1.34	-1.22	-1.31	-1.52	-0.54	-1.12
Worst month	-13.7%	-17.1%	-15.8%	-13.1%	-13.8%	-14.9%	-14.3%	-11.4%	-13.2%
CER vs MVO ($\gamma = 3$)	0.4%	0.4%	0.4%	0.3%	0.0%	0.5%	0.2%	0.9%	0.2%
CER vs MVO ($\gamma = 10$)	0.6%	-0.1%	0.3%	0.6%	0.0%	0.4%	0.5%	-0.4%	0.3%

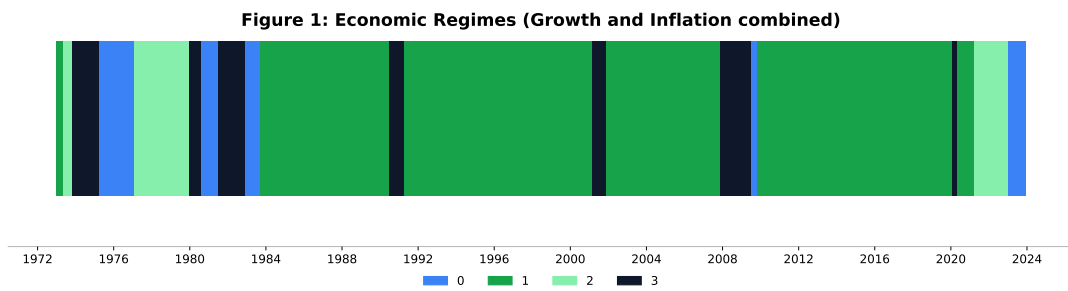


Figure 2: Régimes HMM - Vue d'ensemble

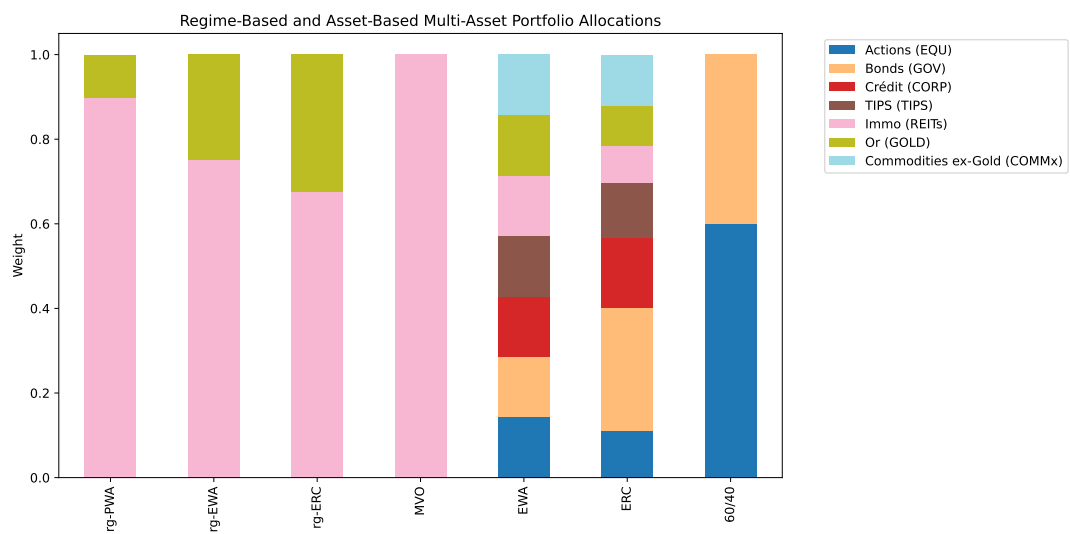


Figure 3: Régimes HMM - Vue d'ensemble