



Munich Personal RePEc Archive

**Extension of the Solow-Swan model with
an environmentalist approach: a
deterministic model for Madagascar**

Josué, ANDRIANADY and Andrianavony, Kanto Joviannah

2024

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/122783/>
MPRA Paper No. 122783, posted 26 Nov 2024 17:26 UTC

Extension of the Solow-Swan model with an
environmentalist approach: a deterministic model
for Madagascar

Extension du modèle Solow Swan vers une approche plus
environnementaliste: un modèle déterministe pour Madagascar

Josué R. ANDRIANADY *

Kanto J. ANDRIANAVONY 

*Corresponding author: jrahiny@gmail.com

Abstract

This paper extends the Solow-Swan growth model by incorporating environmental factors, applied specifically to Madagascar. The model simulates three scenarios: (1) a baseline scenario with low savings and high deforestation; (2) an economic reform scenario with increased savings but no environmental improvements; and (3) a combined reform scenario with higher savings and reduced deforestation. The findings reveal that while economic reforms lead to moderate growth, sustainable natural resource management is essential for balanced and resilient development. The study highlights Madagascar's challenges, including population pressure, deforestation, and climate shocks, and provides insights into policies that align economic and environmental goals. The paper also outlines future improvements, such as developing a stochastic version of the model, to address uncertainties and external shocks more effectively.

Keywords: Economic simulation, physical capital, human capital, natural resources, Madagascar, sustainable development, reforms.

Résumé

Cette étude développe un modèle de simulation numérique pour analyser la croissance économique à long terme de Madagascar sur une période de 100 ans. Le modèle se concentre sur les dynamiques des variables clés : capital physique, capital humain, ressources naturelles et production, en s'appuyant sur une fonction de production Cobb-Douglas. Trois scénarios sont explorés : scénario de référence, réforme économique et réforme économique et environnementale combinée. Les résultats montrent que, bien que l'augmentation de l'épargne et des investissements stimule la productivité, une gestion durable des ressources est essentielle pour garantir une croissance économique à long terme. L'étude met en avant l'importance des réformes intégrées en matière de politique économique, de conservation environnementale et de développement du capital humain pour favoriser une croissance durable et inclusive.

Mots-clés : Simulation économique, capital physique, capital humain, ressources naturelles, Madagascar, développement durable, réformes.

Contents

1	Introduction	4
2	Méthodologie	4
2.1	Objectif	4
2.2	Fonction de production étendue	5
2.3	Composantes dynamiques	5
2.4	Impact environnemental C_t	7
2.5	État stationnaire	7
3	Application au cas de Madagascar	7
3.1	Hypothèses spécifiques au pays	7
3.2	Scénarios simulés	9
3.3	Résumé des scénarios	11
3.4	Simulation numérique	11
4	Résultats	13
4.1	Capital physique par travailleur	13
4.2	Ressources naturelles	13
4.3	Production par travailleur	14
5	Discussion	15
5.1	Analyse des scénarios	15
5.2	Implications pour Madagascar	17
5.3	Limites du modèle	18
6	Conclusion	18
7	Code Matlab	19

1 Introduction

Le modèle de croissance économique de Solow-Swan est un modèle classique qui permet de comprendre les dynamiques de croissance d'une économie à long terme. Développé indépendamment par Robert Solow et Trevor Swan en 1956, ce modèle repose sur l'idée que la croissance économique est déterminée par trois facteurs principaux : le capital, le travail et le progrès technologique. Solow, dans son article pionnier [8], met en évidence l'importance du capital et du travail dans la production, tout en insistant sur la nécessité d'un progrès technologique exogène pour soutenir la croissance à long terme. Swan, de son côté, a développé des idées similaires, en mettant l'accent sur l'accumulation du capital et la relation entre épargne, investissement et croissance dans [9].

Le modèle Solow-Swan suppose que les économies atteignent une situation d'équilibre à long terme, où la croissance du produit par tête est liée à la croissance du progrès technologique, après avoir pris en compte les rendements décroissants du capital. Cependant, le modèle a été critiqué pour son traitement exogène du progrès technologique et pour son manque de prise en compte des spécificités institutionnelles et des interactions complexes propres à chaque économie.

Des études récentes ont appliqué le cadre de Solow-Swan pour évaluer le potentiel économique durable des différents pays, en intégrant les facteurs écologiques et les indicateurs de pollution.[2] Il a été considérablement amélioré, notamment par l'introduction de rendements d'échelle non constants, ce qui permet une compréhension plus nuancée de la dynamique de production.[10]

Dans le contexte spécifique de Madagascar, ce modèle peut être utilisé pour analyser les tendances de croissance économique dans un environnement marqué par des défis particuliers tels que la déforestation et les cyclones, qui affectent la productivité et l'accumulation du capital naturel.

2 Méthodologie

2.1 Objectif

Le modèle vise à simuler la croissance économique d'un pays en prenant en compte les principaux facteurs influençant la production et le développement du pays :

- **Le capital physique** (K_t) : Représente les machines, les infrastructures et les équipements utilisés pour produire des biens et des services.
- **Le capital humain** (H_t) : Inclut l'éducation, la santé et les compétences de la population active, facteurs clés pour améliorer la productivité du travail.
- **Les ressources naturelles** (R_t) : Englobe les terres agricoles, la biodiversité et les autres ressources naturelles disponibles qui sont essentielles pour la production agricole et industrielle.

- **Les chocs environnementaux** (C_t) : Se réfère aux événements tels que les cyclones et la déforestation, qui affectent la capacité de production et la durabilité des ressources naturelles.

Trois scénarios sont simulés pour illustrer l'impact de réformes économiques et environnementales sur la croissance économique et le développement durable de Madagascar. Ces scénarios permettent d'analyser l'effet des politiques publiques, des investissements en capital humain et des stratégies de gestion des ressources naturelles dans un contexte de vulnérabilité environnementale.

2.2 Fonction de production étendue

La production économique totale, notée Y_t , dépend de plusieurs facteurs clés qui reflètent les ressources et capacités d'une économie à un instant t . La fonction de production proposée est donnée par :

$$Y_t = K_t^\alpha H_t^\beta R_t^\gamma (A_t L_t)^{1-\alpha-\beta-\gamma}$$

Les éléments principaux sont définis comme suit :

- K_t : Représente le **capital physique**, tel que les infrastructures, machines et autres équipements utilisés dans le processus de production.
- H_t : Correspond au **capital humain**, qui englobe l'éducation, la santé et les compétences de la population active.
- R_t : Désigne les **ressources naturelles**, telles que les terres agricoles, les forêts et les minerais disponibles à un moment donné.
- A_t : Représente le **progrès technologique**, facteur clé qui améliore l'efficacité des autres intrants.
- L_t : Est la **population active**, c'est-à-dire la main-d'œuvre disponible.

Les paramètres α, β, γ déterminent les contributions relatives des différents intrants au produit total. Ces paramètres respectent les contraintes suivantes :

$$0 < \alpha, \beta, \gamma < 1 \quad \text{et} \quad \alpha + \beta + \gamma < 1,$$

garantissant une décroissance des rendements marginaux et l'importance du progrès technologique.

2.3 Composantes dynamiques

Les intrants de la fonction de production évoluent au fil du temps selon des dynamiques propres. Voici une description détaillée de leur comportement :

Capital physique K_t

Le capital physique est accumulé grâce à l'épargne et aux investissements réalisés dans l'économie, mais il diminue avec le temps en raison de la **dépréciation** et de l'effet du **taux de croissance démographique** n . Son évolution est donnée par :

$$K_{t+1} = sY_t + (1 - \delta - n)K_t,$$

où :

- s est le taux d'épargne, représentant la fraction du revenu Y_t réinvestie.
- δ est le taux de dépréciation, qui reflète l'usure et l'obsolescence des biens de capital.
- n est le taux de croissance démographique, influençant le besoin de renouvellement de capital par travailleur.

Capital humain H_t

Le capital humain est crucial pour soutenir la productivité. Il évolue en fonction du **progrès technologique** g et des investissements dans l'éducation et la formation. Son évolution est modélisée comme suit :

$$H_{t+1} = H_t \cdot (1 + g),$$

où $g > 0$ représente le taux de croissance du progrès technologique.

Ressources naturelles R_t

Les ressources naturelles sont sujettes à des contraintes environnementales. Une surexploitation ou une dégradation rapide peut réduire leur disponibilité. L'évolution des ressources naturelles est donnée par :

$$R_{t+1} = R_t \cdot (1 - \rho),$$

où ρ est le taux de diminution des ressources naturelles, influencé par des activités telles que la déforestation, l'exploitation minière ou la pollution.

Progrès technologique A_t

Le progrès technologique est un facteur exogène dans ce modèle, permettant d'augmenter la production sans accroître proportionnellement les autres intrants. Il évolue selon un taux constant g , modélisé par :

$$A_t = A_0 e^{gt},$$

où A_0 est le niveau initial de la technologie.

2.4 Impact environnemental C_t

Les facteurs environnementaux, tels que les **chocs climatiques** (tempêtes, sécheresses), peuvent temporairement réduire la productivité. Ces impacts sont modélisés par une modification du progrès technologique, tel que :

$$A_t = A_0 e^{(g-C_t)t},$$

où C_t représente l'intensité des impacts climatiques. Une augmentation de C_t réduit l'efficacité des intrants, ralentissant ainsi la croissance.

2.5 État stationnaire

Dans ce modèle, l'économie tend vers un état stationnaire où les principales variables (production par travailleur, capital par travailleur, etc.) atteignent un taux de croissance constant. Cet équilibre se caractérise par :

- Une production par travailleur qui croît au même rythme que le progrès technologique g .
- Une stabilisation des rapports entre les intrants (par exemple, $\frac{K_t}{L_t}$ et $\frac{H_t}{L_t}$).

L'état stationnaire permet de comprendre les trajectoires de croissance de long terme et les impacts des politiques économiques ou environnementales.

3 Application au cas de Madagascar

Dans cette section, nous appliquons le modèle économique étendu au cas spécifique de Madagascar en tenant compte des conditions particulières du pays. Nous faisons des hypothèses basées sur des données réelles et des tendances observées pour évaluer l'impact de ces facteurs sur la production et la croissance de l'économie malgache.

3.1 Hypothèses spécifiques au pays

Voici les principales hypothèses spécifiques à Madagascar, qui influencent la dynamique de la production, des ressources naturelles et du capital humain dans le modèle :

Faible taux d'épargne ($s = 0.12$)

Le taux d'épargne, qui détermine la fraction des revenus qui est réinvestie dans l'économie sous forme de capital physique, est faible à Madagascar. En effet, la majorité des revenus des ménages sont consommés, ce qui limite la capacité d'investissement dans les infrastructures, le capital physique et les technologies. Cela signifie que la croissance économique est en grande partie financée par des

sources externes ou par des investissements publics. Un faible taux d'épargne ralentit donc l'accumulation de capital, ce qui peut freiner le développement économique à long terme.[6]

$$s = 0.12 \quad (\text{seulement } 12\% \text{ du revenu est épargné et réinvesti})$$

Cela se traduit par une accumulation lente de capital physique, ce qui limite la croissance de la production par travailleur.

Croissance démographique élevée ($n = 2.7\%$)

Madagascar connaît une croissance démographique élevée, avec un taux annuel de croissance de la population d'environ 2,7% [7]. Cela met une pression considérable sur les ressources disponibles, notamment sur les terres agricoles, l'eau, et les autres ressources naturelles nécessaires à la production. De plus, une croissance rapide de la population crée une demande croissante de biens et de services, ce qui peut conduire à une saturation des capacités de production.

$$n = 2.7\% \quad (\text{croissance démographique annuelle})$$

Cette pression démographique peut également nuire à la productivité par travailleur, car il devient plus difficile d'investir dans des équipements modernes et dans l'éducation des travailleurs.

Déforestation rapide ($\rho = 2\%$)

La déforestation est un problème environnemental majeur à Madagascar, avec un taux annuel de déforestation de l'ordre de 2% ¹. Cela affecte directement les ressources naturelles disponibles R_t , notamment les terres agricoles, les forêts et les autres ressources naturelles utilisées pour l'agriculture et l'industrie. La réduction des ressources naturelles, en particulier les terres agricoles fertiles, peut avoir un impact négatif sur la production, en particulier dans les secteurs agricoles, qui représentent une part importante de l'économie malgache.[11]

$$\rho = 2\% \quad (\text{perte annuelle de ressources naturelles due à la déforestation})$$

La diminution des ressources naturelles entraîne une baisse des rendements agricoles, ce qui limite la capacité de production du pays et exacerbe la pauvreté dans les zones rurales.

¹1,1% dans l'article de référence mais pour mieux capter on a surévalué à 2%

Cyclones fréquents (C_t)

Madagascar est régulièrement touché par des cyclones majeurs, qui perturbent la production agricole, les infrastructures et la vie quotidienne. En moyenne, le pays subit un cyclone majeur tous les 2 ans [5]. Ces événements ont un impact direct sur le progrès technologique A_t , car ils entraînent des destructions de capital physique et des perturbations économiques.

C_t (intensité des cyclones, avec environ un cyclone majeur tous les 2 ans)

Les cyclones affectent également la productivité des autres facteurs de production, notamment en réduisant temporairement l'efficacité du capital humain et des ressources naturelles. Cela entraîne des pertes économiques temporaires, mais aussi des effets à long terme sur la croissance si les destructions sont considérables.

Faible éducation et santé

Le capital humain, représenté par H_t , est un facteur clé pour la croissance économique. À Madagascar, le niveau initial d'éducation et de santé est relativement faible, ce qui limite la productivité de la main-d'œuvre. Cependant, il existe des possibilités d'amélioration via des réformes éducatives et sanitaires. Si des investissements sont réalisés dans l'éducation, la formation professionnelle et le système de santé, cela pourrait contribuer à un accroissement du capital humain et, par conséquent, à une augmentation de la productivité du travail.

H_t (niveau initial faible, mais possibilité d'amélioration par des réformes)

Les réformes dans ces domaines peuvent permettre une croissance plus rapide du capital humain, ce qui aurait des effets positifs sur la production à long terme, en particulier si elles sont accompagnées d'investissements dans des technologies modernes et une meilleure gestion des ressources humaines.

3.2 Scénarios simulés

Trois scénarios sont simulés pour analyser les impacts des réformes économiques et environnementales sur la croissance économique et le développement durable de Madagascar. Chaque scénario repose sur des hypothèses différentes concernant le taux d'épargne et le taux de déforestation, deux facteurs cruciaux pour le développement économique du pays.

Scénario 1 : Baseline (situation actuelle)

Le scénario de base représente la situation actuelle de Madagascar, avec des hypothèses proches des conditions réelles du pays :

- **Faible épargne** ($s = 12\%$) : Actuellement, le taux d'épargne est faible, ce qui signifie que seulement 12% du revenu est réinvesti dans l'économie. Cela limite les investissements dans le capital physique et l'amélioration des infrastructures. Un faible taux d'épargne réduit la capacité de croissance à long terme et peut entraîner des déficits d'investissements dans les secteurs clés pour le développement économique.
- **Déforestation rapide** ($\rho = 2\%$) : La déforestation reste élevée, avec une perte de 2% des ressources forestières chaque année. Cette déforestation rapide diminue les terres agricoles disponibles, réduit la biodiversité et affecte la capacité de production, notamment dans l'agriculture et l'exploitation des ressources naturelles.

Ce scénario permet d'observer les effets d'une situation où la gestion des ressources naturelles et les investissements sont insuffisants, entraînant une croissance économique limitée et des problèmes environnementaux croissants.

Scénario 2 : Réforme économique

Le deuxième scénario suppose qu'une réforme économique a lieu, visant à améliorer les investissements et à encourager la croissance à long terme. Les hypothèses suivantes sont modifiées par rapport au scénario de base :

- **Augmentation du taux d'épargne** ($s = 20\%$) : Le taux d'épargne passe à 20%, ce qui représente une amélioration notable par rapport au scénario de base. Cela permettrait une augmentation des investissements dans le capital physique (machines, infrastructures) et dans les secteurs technologiques, stimulant ainsi la croissance économique. Ce changement favorise également une accumulation plus rapide de capital, nécessaire pour un développement durable à long terme.
- **Déforestation reste rapide** ($\rho = 2\%$) : Bien que l'épargne et les investissements augmentent, la déforestation demeure rapide. Cela reflète la difficulté d'implémenter des réformes environnementales sans une volonté politique forte ou un contrôle efficace des pratiques agricoles et industrielles. Ce scénario illustre un cas où les réformes économiques ne sont pas accompagnées de réformes environnementales, menant à une croissance économique mais également à une pression continue sur les ressources naturelles.

Dans ce scénario, l'économie bénéficie d'une stimulation par l'augmentation des investissements, mais la dégradation environnementale continue d'être un frein au développement durable.

Scénario 3 : Réforme économique et environnementale

Le troisième scénario combine à la fois des réformes économiques et environnementales. Cela permet de simuler un futur où Madagascar adopte des politiques équilibrées qui visent à stimuler la croissance économique tout en protégeant l'environnement.

- **Taux d'épargne élevé** ($s = 20\%$) : Le taux d'épargne est maintenu à 20%, encourageant ainsi les investissements et permettant à l'économie de croître plus rapidement, avec un accent particulier sur l'amélioration des infrastructures et de la productivité. Cela devrait également favoriser une meilleure résilience face aux chocs économiques.
- **Réduction de la déforestation** ($\rho = 1\%$) : La déforestation est réduite à un taux de 1% par an, grâce à des politiques environnementales visant à limiter la perte des ressources forestières. Des pratiques agricoles durables, des investissements dans la gestion des ressources naturelles et des initiatives de reforestation sont mises en œuvre pour préserver l'environnement tout en soutenant la croissance économique. Cette réduction de la déforestation permet d'assurer un développement plus durable à long terme.

Ce scénario vise à illustrer comment des réformes combinées peuvent à la fois stimuler la croissance économique et préserver les ressources naturelles, favorisant ainsi un développement plus équilibré et durable.

3.3 Résumé des scénarios

Les trois scénarios simulés permettent d'évaluer l'impact des réformes économiques et environnementales sur la trajectoire de croissance de Madagascar. Le premier scénario représente la situation actuelle, avec des limitations liées à un faible taux d'épargne et à une déforestation rapide. Le second scénario examine les effets d'une réforme économique sans changement significatif en matière de gestion des ressources naturelles. Enfin, le troisième scénario montre les avantages d'une réforme économique accompagnée de politiques environnementales visant à réduire la déforestation.

3.4 Simulation numérique

Le modèle a été simulé sur un horizon temporel de 100 ans ($T = 100$). À chaque période, les dynamiques des variables clés du modèle, à savoir le capital physique (K_t), le capital humain (H_t), les ressources naturelles (R_t) et la production (Y_t), sont calculées en suivant les équations suivantes :

Équations de mise à jour

Les dynamiques des différentes variables sont modélisées à l'aide des équations suivantes :

- **Capital physique (K_t)** : Le capital physique évolue en fonction du taux d'épargne, de la production réalisée et de l'accumulation nette après dépréciation et croissance démographique. L'équation de mise à jour est la suivante :

$$K_{t+1} = sY_t + (1 - \delta - n)K_t$$

où s est le taux d'épargne, Y_t est la production à la période t , δ est le taux de dépréciation du capital, et n est le taux de croissance démographique.

- **Capital humain (H_t)** : Le capital humain évolue en fonction du progrès technologique (g). L'équation de mise à jour est donnée par :

$$H_{t+1} = H_t \cdot (1 + g)$$

où H_t représente le stock de capital humain à la période t , et g est le taux de progrès technologique.

- **Ressources naturelles (R_t)** : Les ressources naturelles évoluent en fonction du taux de déforestation (ρ), qui représente la perte annuelle des ressources naturelles en pourcentage. L'équation de mise à jour est la suivante :

$$R_{t+1} = R_t \cdot (1 - \rho)$$

où R_t est la quantité de ressources naturelles à la période t , et ρ est le taux de déforestation.

- **Production (Y_t)** : La production économique à la période t est déterminée par une fonction de production Cobb-Douglas qui intègre le capital physique, le capital humain et les ressources naturelles. L'équation de production est :

$$Y_t = K_t^\alpha H_t^\beta R_t^\gamma$$

où α , β , et γ sont les élasticités respectives du capital physique, du capital humain et des ressources naturelles dans la production.

Paramètres utilisés

Les valeurs des paramètres utilisées dans la simulation sont les suivantes :

- $\alpha = 0.3$: L'élasticité du capital physique dans la production.
- $\beta = 0.4$: L'élasticité du capital humain dans la production.
- $\gamma = 0.1$: L'élasticité des ressources naturelles dans la production.
- $\delta = 0.05$: Le taux de dépréciation du capital physique (5% par an).
- $g = 0.015$: Le taux de progrès technologique (1.5% par an).

- $n = 0.027$: Le taux de croissance démographique (2.7% par an).

Ces paramètres ont été choisis pour refléter les conditions économiques et environnementales spécifiques de Madagascar. Le taux de croissance démographique est relativement élevé, ce qui exerce une pression sur les ressources et la productivité. Le taux de dépréciation du capital est modéré, ce qui signifie qu'une partie importante du capital est renouvelée chaque année. Le progrès technologique est également pris en compte pour simuler l'amélioration continue de la productivité.

4 Résultats

Les résultats des simulations effectuées sur un horizon de 100 ans pour les trois scénarios sont présentés sous forme de graphiques, permettant d'illustrer les tendances de différentes variables économiques et environnementales.

4.1 Capital physique par travailleur

Scénario Baseline (rouge) : Dans ce scénario de référence, où la faible épargne limite l'investissement, la croissance du capital physique par travailleur est lente et progressive. Le taux d'épargne étant de seulement 12%, les investissements dans le capital physique sont insuffisants pour stimuler une croissance rapide de la productivité. Le capital par travailleur croît à un rythme modeste, ce qui traduit une lente modernisation de l'économie.

Scénario Réforme économique (bleu) : Lorsque le taux d'épargne est augmenté à 20%, le capital physique par travailleur connaît une croissance plus rapide. Cette augmentation de l'épargne permet des investissements plus importants dans les infrastructures et les équipements, favorisant ainsi une accélération de la productivité et de la croissance économique. Les progrès sont notables par rapport au scénario de référence, bien que la croissance soit limitée à long terme par l'épuisement des ressources naturelles.

Scénario Réforme économique + environnementale (vert) : En combinant les réformes économiques et environnementales, la croissance du capital par travailleur continue d'être plus rapide qu'en situation de référence, mais elle est également soutenue par la durabilité environnementale. La gestion améliorée des ressources naturelles, comme la réduction de la déforestation, permet de maintenir un environnement productif et stable. Le capital physique par travailleur continue de croître à un rythme élevé, mais de manière plus équilibrée et durable sur le long terme.

4.2 Ressources naturelles

Scénario baseline (rouge) : Dans ce scénario, la déforestation rapide, à un taux de 2%, conduit à un déclin accéléré des ressources naturelles. L'exploitation non durable des forêts et des terres agricoles contribue à l'épuisement des ressources,

ce qui exerce une pression sur la productivité agricole et la stabilité écologique du pays. Ce déclin rapide des ressources naturelles constitue un frein majeur à la croissance économique à long terme, car il impacte directement la base productive du pays.

Scénario réforme économique (bleu) : Bien que l'épargne accrue dans ce scénario permette des investissements substantiels, les ressources naturelles continuent de se dégrader au même rythme qu'en situation de référence, soit 2% par an. En l'absence de réformes environnementales, la gestion des ressources naturelles ne s'améliore pas, ce qui reste un facteur limitant pour la durabilité de la croissance économique. Les politiques de gestion des ressources naturelles restent insuffisantes pour ralentir le déclin des ressources.

Scénario réforme économique + environnementale (vert) : Dans ce scénario intégré, l'augmentation de l'épargne s'accompagne de réformes environnementales visant à réduire le taux de déforestation à 1%. Ce changement dans la gestion des ressources naturelles ralentit considérablement leur déclin. La réduction de la pression sur les terres agricoles et les forêts permet de maintenir un stock de ressources naturelles plus stable, ce qui soutient une croissance économique plus durable et équilibrée. Les politiques environnementales contribuent ainsi à ralentir l'épuisement des ressources, assurant une meilleure base pour une croissance économique à long terme.

4.3 Production par travailleur

Scénario baseline (rouge) : La production par travailleur dans ce scénario reste limitée, principalement à cause du faible capital physique et de l'épuisement rapide des ressources naturelles. L'absence d'investissement suffisant dans le capital et la dégradation des terres et des forêts freinent l'augmentation de la productivité. En conséquence, la croissance économique est faible et la productivité des travailleurs stagne, ce qui rend difficile l'amélioration des niveaux de vie à long terme.

Scénario réforme économique (bleu) : Dans le scénario où le taux d'épargne est augmenté, la production par travailleur croît de manière significative grâce à un capital physique accru. Cependant, cette croissance est partiellement freinée par la dégradation continue des ressources naturelles, qui limite les rendements agricoles et industriels. Bien que la productivité s'améliore, elle reste vulnérable à l'épuisement des ressources et ne peut se maintenir à long terme sans réformes environnementales.

Scénario réforme économique + environnementale (vert) : Dans le scénario combiné, la production par travailleur connaît une croissance soutenue et équilibrée. L'augmentation du capital physique par travailleur, associée à une gestion plus durable des ressources naturelles, permet de maintenir un environnement productif et stable. La réduction de la déforestation permet de préserver les ressources naturelles nécessaires à la production, et la productivité des travailleurs augmente à un rythme plus soutenu, car la base de ressources reste stable. Ce scénario illustre bien que la durabilité environnementale et les réformes économiques doivent aller

de pair pour maximiser la croissance de la production par travailleur sur le long terme.

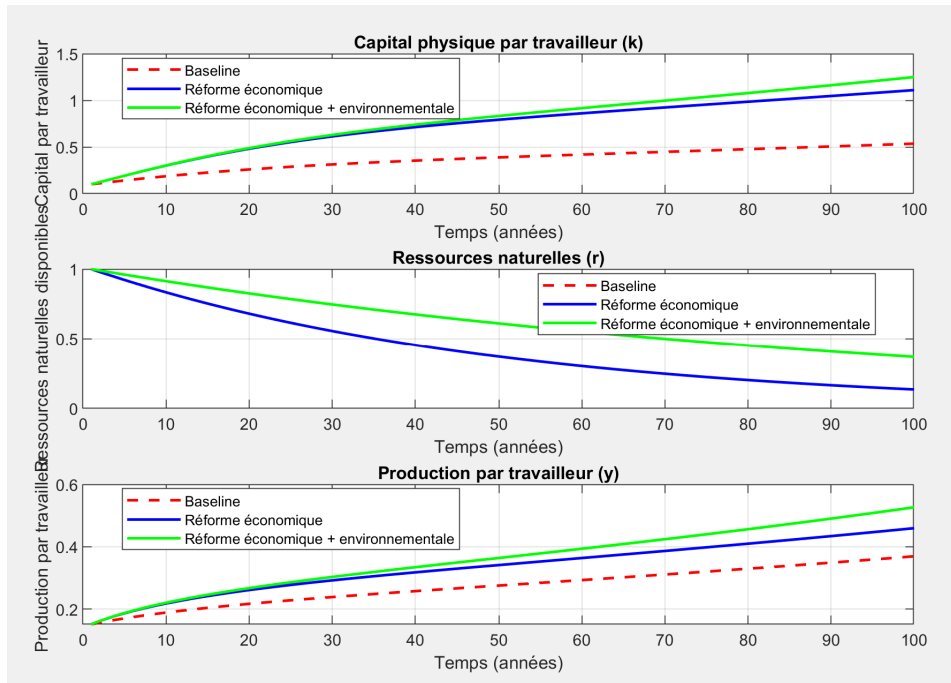


Figure 1: Résultat du modèle

5 Discussion

5.1 Analyse des scénarios

Scénario baseline : Dans le scénario de référence, qui reflète la situation actuelle de Madagascar, nous observons les effets d'une faible épargne nationale sur la croissance économique du pays. Le taux d'épargne fixé à 12%, est insuffisant pour générer des investissements substantiels dans le capital physique. Cela signifie qu'une proportion importante des revenus nationaux est consommée et non investie, ce qui freine l'accumulation de capital et empêche la modernisation des infrastructures et des technologies. En conséquence, l'économie croît lentement et les gains de productivité sont limités. Parallèlement, la déforestation rapide avec un taux de dégradation des ressources naturelles fixé à 2% entraîne un épuisement accéléré des ressources essentielles à la production, notamment les terres agricoles. Ce qui représente une menace directe pour la durabilité de l'économie à long terme. En effet, la déforestation non contrôlée réduit non seulement la disponibilité de ressources naturelles vitales mais aggrave également les problèmes environnementaux tels que l'érosion des sols et la perte de biodiversité. Ce qui compromet les rendements agricoles et à terme la stabilité économique. Ainsi, la combinai-

son de faibles investissements dans le capital physique et la gestion déficiente des ressources naturelles génère un cercle vicieux qui limite non seulement la croissance à court terme mais aussi la résilience de l'économie face aux défis à long terme.

Scénario de réforme économique : Dans ce scénario, une réforme économique est mise en place, visant à augmenter le taux d'épargne à 20%. Cette augmentation substantielle de l'épargne permet de libérer des ressources internes afin de financer les investissements nécessaires à la croissance du capital physique. Les investissements dans des infrastructures modernes et des technologies plus productives stimulent la production et la compétitivité de l'économie malgache. En effet, une épargne plus élevée améliore l'accumulation de capital, ce qui se traduit par une augmentation de la productivité et un renforcement des secteurs clés comme l'agriculture, l'industrie et les services. Cependant, malgré cette avancée sur le plan économique, la déforestation rapide demeure un problème majeur. Tant que les ressources naturelles continuent d'être surexploitées à un rythme de 2%, leur épuisement progressif limitera les gains à long terme. Cela montre clairement que la seule augmentation de l'épargne et des investissements physiques ne suffit pas pour garantir une croissance économique durable. Il devient évident qu'une réforme de la gestion des ressources naturelles est nécessaire pour éviter son épuisement et pour protéger les écosystèmes vitaux sur lesquels repose la productivité de l'économie. En d'autres termes, bien qu'une réforme économique puisse améliorer la situation à court terme, la durabilité de la croissance nécessite un équilibre entre l'investissement dans le capital physique et une gestion prudente des ressources naturelles.

Scénario de réforme économique et environnementale : Dans ce scénario optimal, une réforme à la fois économique et environnementale est mise en place avec un taux d'épargne porté à 20% et une réduction de la déforestation à un taux de 1%. L'augmentation de l'épargne permet toujours un investissement soutenu dans le capital physique mais c'est la gestion plus durable des ressources naturelles qui distingue ce scénario. En ralentissant la déforestation, Madagascar protège ses ressources naturelles, ce qui assure la stabilité des rendements agricoles à long terme et préserve la biodiversité qui est essentielle pour maintenir l'équilibre des écosystèmes. Une gestion durable des terres permet non seulement de maintenir la production agricole mais aussi de diversifier les secteurs économiques en encourageant des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement comme l'agroforesterie, qui peuvent à la fois améliorer la productivité et limiter la pression sur les sols et les forêts. La réduction de la déforestation contribue ainsi à une plus grande résilience de l'économie face aux chocs environnementaux tout en assurant une base solide pour la croissance à long terme. Ce scénario montre qu'une croissance économique soutenue et durable est possible lorsqu'il y a une synergie entre les réformes économiques et environnementales. Cette approche intégrée garantit non seulement une meilleure exploitation des ressources naturelles mais aussi une croissance plus équilibrée où les bénéfices de la croissance économique sont durables et partagés de manière équitable.

5.2 Implications pour Madagascar

Réformes économiques : Pour stimuler une croissance économique soutenue, il est crucial de mettre en place des réformes visant à encourager l'épargne nationale. Cela peut se faire à travers des incitations fiscales et une amélioration de l'accès aux services financiers pour les ménages et les entreprises. Par exemple, des politiques fiscales favorables, telles que des exonérations fiscales sur les revenus d'épargne ou des incitations à l'investissement privé peuvent inciter davantage de personnes à épargner et à investir dans l'économie nationale. De plus, l'accès aux services bancaires et financiers doit être élargi, notamment dans les zones rurales où la population a souvent un accès limité aux institutions financières. Parallèlement, il est essentiel d'attirer des investissements directs étrangers (IDE), notamment dans les secteurs clés comme l'agriculture, l'industrie, et les infrastructures. Cela peut être réalisé par la simplification des procédures administratives, la réduction des barrières à l'investissement et la mise en place d'incitations pour les investisseurs étrangers. Ces investissements étrangers peuvent non seulement apporter des capitaux nécessaires pour financer le développement des infrastructures, mais aussi des technologies avancées et de nouvelles méthodes de gestion qui favoriseront la productivité et la compétitivité de l'économie malgache.

Réformes environnementales : La gestion des ressources naturelles et la lutte contre la déforestation sont des éléments essentiels pour assurer un développement économique durable. Madagascar dispose d'une richesse naturelle exceptionnelle mais la déforestation rapide menace cette richesse et les secteurs qui en dépendent comme l'agriculture et le tourisme. Des réformes environnementales doivent être mises en place pour réduire la déforestation, notamment par la régulation stricte de l'exploitation illégale du bois et en renforçant les politiques de gestion forestière. Le gouvernement pourrait aussi mettre en œuvre des programmes de reforestation à grande échelle pour restaurer les écosystèmes dégradés et améliorer la couverture forestière. En outre, il est essentiel d'investir dans des pratiques agricoles durables pour réduire la pression sur les terres. L'agroforesterie, les techniques agricoles de conservation des sols et la promotion de cultures moins destructrices pour l'environnement peuvent contribuer à préserver la biodiversité tout en maintenant la productivité agricole.

Capital humain : Le développement du capital humain est un levier clé pour augmenter la productivité et soutenir la croissance économique de Madagascar. Il est essentiel d'investir dans l'éducation et la santé pour améliorer la productivité globale du travail et renforcer la compétitivité du pays. Des programmes de formation adaptés aux besoins du marché du travail, notamment dans les secteurs en croissance tels que l'industrie, les services et la technologie, permettront aux jeunes générations de mieux se préparer à relever les défis économiques à venir. En parallèle, des investissements dans les infrastructures de santé amélioreront l'espérance de vie et la qualité de la main-d'œuvre, en réduisant les taux de mortalité et en garantissant un meilleur état de santé général de la population. Cela aura un effet direct sur la productivité car une population en meilleure santé est plus productive.

et capable de participer activement au processus économique. De plus, en offrant une éducation de qualité, Madagascar pourrait former des leaders et des travailleurs qualifiés capables de stimuler l'innovation et d'adopter des technologies nouvelles qui accroîtront la compétitivité du pays sur le marché international.

5.3 Limites du modèle

Le modèle développé dans cet article présente plusieurs limites dues à sa nature déterministe, ce qui signifie qu'il repose sur des équations et des paramètres fixes, sans intégrer de facteurs d'incertitude. Cette approche simplifiée permet d'analyser les relations fondamentales entre les différentes variables économiques, mais elle ne prend pas en compte l'impact des chocs exogènes tels que des crises économiques, des catastrophes naturelles ou des fluctuations imprévues des prix mondiaux. Ces événements qui peuvent perturber de manière significative la production et l'épuisement des ressources naturelles, ne sont pas reflétés dans le modèle actuel. De plus, le modèle ne capture pas les interactions complexes et non linéaires entre les variables économiques. Par exemple, une augmentation du taux d'épargne pourrait avoir des effets différents selon d'autres facteurs externes comme les investissements étrangers ou les politiques fiscales qui sont omis ici. En outre, le modèle repose sur l'hypothèse d'une croissance stable et continue, ce qui est loin d'être le cas dans la réalité, où les économies sont soumises à des fluctuations, des ruptures et des périodes de volatilité. Ces aspects de la réalité économique rendent le modèle déterministe moins pertinent pour simuler l'incertitude à laquelle une économie peut être confrontée. Pour remédier à ces limitations, une version stochastique du modèle sera développée dans un futur travail, afin d'intégrer des éléments de hasard et d'incertitude. Cette version permettra de mieux comprendre les effets des chocs imprévus et d'examiner les réactions économiques sous des conditions de variabilité, offrant ainsi une perspective plus réaliste et complète sur les trajectoires économiques et les stratégies d'adaptation face aux risques.

6 Conclusion

Conclusion Cette étude souligne l'importance d'une approche intégrée pour assurer une croissance économique durable à Madagascar. L'extension du modèle de Solow-Swan montre que, bien que les réformes économiques puissent stimuler la croissance à court terme en augmentant les investissements dans le capital physique, elles ne suffisent pas à garantir une durabilité à long terme sans une gestion prudente des ressources naturelles. La combinaison de politiques économiques et environnementales s'avère être la solution optimale allée à la fois à la croissance économique et à la préservation des ressources naturelles essentielles. En particulier, la réduction du taux de déforestation et l'investissement dans le capital humain sont des leviers cruciaux pour renforcer la résilience économique et écologique du pays face aux chocs climatiques et à la pression démographique

croissante. Cependant, le modèle présente des limites, notamment en ne prenant pas en compte les incertitudes et les chocs exogènes. Ces limitations ouvrent des perspectives pour des travaux futurs, comme l'intégration d'une version stochastique du modèle, permettant d'explorer des scénarios plus réalistes. Ainsi, cette étude fournit non seulement une base analytique solide, mais également des orientations stratégiques pour les décideurs cherchant à promouvoir un développement durable à Madagascar.

7 Code Matlab

```
% Paramètres de base
alpha = 0.3;          % Part du capital physique
beta = 0.4;          % Part du capital humain
gamma = 0.1;         % Part des ressources naturelles
delta = 0.05;        % Taux de dépréciation du capital
n = 0.027;           % Croissance démographique
g = 0.015;           % Progrès technologique
T = 100;             % Horizon temporel (100 ans)
k0 = 0.1;            % Capital physique initial
h0 = 0.05;           % Capital humain initial
r0 = 1;              % Ressources naturelles initiales (normalisé)

% Scénarios : paramètres spécifiques
s_baseline = 0.12; % Taux d'épargne baseline
s_reforme = 0.20; % Taux d'épargne après réforme
rho_baseline = 0.02; % Taux de déforestation baseline
rho_reforme = 0.01; % Réduction de la déforestation

% Initialisation des variables
k_baseline = zeros(1, T);
h_baseline = zeros(1, T);
r_baseline = zeros(1, T);
y_baseline = zeros(1, T);

k_reforme = zeros(1, T);
h_reforme = zeros(1, T);
r_reforme = zeros(1, T);
y_reforme = zeros(1, T);

k_env_reforme = zeros(1, T);
h_env_reforme = zeros(1, T);
r_env_reforme = zeros(1, T);
```

```

y_env_reforme = zeros(1, T);

% Initialisation des valeurs initiales
k_baseline(1) = k0; h_baseline(1) = h0; r_baseline(1) = r0;
k_reforme(1) = k0; h_reforme(1) = h0; r_reforme(1) = r0;
k_env_reforme(1) = k0; h_env_reforme(1) = h0; r_env_reforme(1) = r0;

% Simulation des scénarios
for t = 1:T-1
% Scénario 1 : Baseline
y_baseline(t) = k_baseline(t)^alpha * h_baseline(t)^beta * r_baseline(t)^gamma;
k_baseline(t+1) = s_baseline * y_baseline(t) + (1 - delta - n) * k_baseline(t);
h_baseline(t+1) = h_baseline(t) * (1 + g);
r_baseline(t+1) = r_baseline(t) * (1 - rho_baseline);

% Scénario 2 : Réforme économique
y_reforme(t) = k_reforme(t)^alpha * h_reforme(t)^beta * r_reforme(t)^gamma;
k_reforme(t+1) = s_reforme * y_reforme(t) + (1 - delta - n) * k_reforme(t);
h_reforme(t+1) = h_reforme(t) * (1 + g);
r_reforme(t+1) = r_reforme(t) * (1 - rho_baseline); % Déforestation inchangée

% Scénario 3 : Réforme économique et environnementale
y_env_reforme(t) = k_env_reforme(t)^alpha * h_env_reforme(t)^beta * r_env_reforme(t)^gamma;
k_env_reforme(t+1) = s_reforme * y_env_reforme(t) + (1 - delta - n) * k_env_reforme(t);
h_env_reforme(t+1) = h_env_reforme(t) * (1 + g);
r_env_reforme(t+1) = r_env_reforme(t) * (1 - rho_reforme); % Réduction de déforestation
end

% Dernière valeur pour chaque scénario
y_baseline(T) = k_baseline(T)^alpha * h_baseline(T)^beta * r_baseline(T)^gamma;
y_reforme(T) = k_reforme(T)^alpha * h_reforme(T)^beta * r_reforme(T)^gamma;
y_env_reforme(T) = k_env_reforme(T)^alpha * h_env_reforme(T)^beta * r_env_reforme(T)^gamma;

% Graphiques des résultats
figure;

% Graphique 1 : Capital physique par travailleur
subplot(3,1,1);
plot(1:T, k_baseline, 'r--', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(1:T, k_reforme, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
plot(1:T, k_env_reforme, 'g-', 'LineWidth', 1.5);
title('Capital physique par travailleur (k)');
xlabel('Temps (années)');
ylabel('Capital par travailleur');

```

```

legend('Baseline', 'Réforme économique', 'Réforme économique + environnem
grid on;

% Graphique 2 : Ressources naturelles
subplot(3,1,2);
plot(1:T, r_baseline, 'r--', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(1:T, r_reforme, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
plot(1:T, r_env_reforme, 'g-', 'LineWidth', 1.5);
title('Ressources naturelles (r)');
xlabel('Temps (années)');
ylabel('Ressources naturelles disponibles');
legend('Baseline', 'Réforme économique', 'Réforme économique + environnem
grid on;

% Graphique 3 : Production par travailleur
subplot(3,1,3);
plot(1:T, y_baseline, 'r--', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(1:T, y_reforme, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
plot(1:T, y_env_reforme, 'g-', 'LineWidth', 1.5);
title('Production par travailleur (y)');
xlabel('Temps (années)');
ylabel('Production par travailleur');
legend('Baseline', 'Réforme économique', 'Réforme économique + environnem
grid on;

```

References

- [1] Acemoglu, D. (2009). *Introduction to modern economic growth*. Princeton University Press.
- [2] Anderson, Quintero, Manuel, González, Gómez, Mercedes, Gaitán, "Fuzzy classification of countries according to their sustainable economic potential: application of the Solow-Swan and Green Solow models", 2023, DOI <https://doi.org/10.31223/x57q3z>.
- [3] Lucas Jr., R. E. (1988). On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(88\)90168-7](https://doi.org/10.1016/0304-3932(88)90168-7)
- [4] Mankiw, N. G., Romer, D., & Weil, D. (1992). A contribution to the empirics of economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, 107(2), 407–437.
- [5] La Maison de Madagascar Suisse. (2024, November 25). Les cyclones à Madagascar. <https://maison-de-madagascar.ch/tout-sur-madagascar/les-cyclones-a-madagascar/#::~>

text=Tous%20les%20deux%20ou%20trois,%20dans%20la%
20mémoire%20des%20gens

- [6] Perspective Monde. (2024, November 25). Épargne domestique à Madagascar. <https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays/?codeStat=NY.GDS.TOTL.ZS&codePays=MDG&codeTheme=2>
- [7] Perspective Monde. (2024, November 25). Bilan de la tendance statistique de Madagascar. <https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays/?codeTheme=1&codeStat=NY.GDS.TOTL.ZS&codePays=MDG&optionsPeriodes=Aucune&codeTheme2=1&codeStat2=x&codePays2=MDG&optionsDetPeriodes=avecNomP>
- [8] Solow, R. M. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70, 65–94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- [9] Swan, T. W. (1956). Economic growth and capital accumulation. *Economic Record*, 32(2), 334–361. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4932.1956.tb00434.x>
- [10] (2022), "Exact solutions for a Solow-Swan model with non-constant returns to scale", *Indian Journal of Pure & Applied Mathematics*, DOI <https://doi.org/10.1007/s13226-022-00341-7>.
- [11] Vieilledent, G., Grinand, C., Rakotomalala, F. A., Ranaivosoa, R., Rakotoarijaona, J.-R., Allnutt, T. F., & Achard, F. (2018). Combining global tree cover loss data with historical national forest cover maps to look at six decades of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Biological Conservation*, 222, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.008>