

# Évaluation des actifs durables (SAVi) du parc éolien de Taïba N'Diaye au Sénégal

Gros plan sur les infrastructures  
énergétiques

**SYNTHÈSE DES RÉSULTATS**



© 2019 The International Institute for Sustainable Development  
Publié par l'International Institute for Sustainable Development

### International Institute for Sustainable Development

L'Institut international du développement durable (IISD) est un groupe de réflexion indépendant qui étudie des solutions durables aux problèmes du XXI<sup>e</sup> siècle. Notre mission est de promouvoir le développement humain et la durabilité environnementale. Pour cela, nous effectuons un travail de recherche, d'analyse et d'obtention de connaissances qui soutient l'élaboration de politiques saines. Notre vision globale nous permet d'aborder les causes profondes de certains des grands problèmes auxquels notre planète est confrontée aujourd'hui : la destruction de l'environnement, l'exclusion sociale, les lois et les règles économiques injustes, le changement climatique. L'équipe de l'IISD, qui représente plus de 120 personnes, plus de 50 associés et une centaine de consultants, vient du monde entier et de secteurs très différents. Notre travail a un impact sur la vie des habitants de près de 100 pays. Avec une démarche autant scientifique que stratégique, l'IISD apporte le savoir nécessaire à l'action.

L'IISD est enregistré en tant qu'organisme de bienfaisance au Canada et a le statut 501 (c) (3) aux États-Unis. L'IISD bénéficie de subventions de fonctionnement de la province du Manitoba. L'Institut reçoit également des financements de plusieurs gouvernements en dehors du Canada, et de plusieurs agences des Nations Unies, des fondations, des acteurs du secteur privé et des particuliers.



### MAVA Foundation

Créée en 1994 par feu Dr Luc Hoffmann, la MAVA est une fondation philanthropique familiale basée en Suisse, avec un bureau régional à Dakar, Sénégal. La mission de la MAVA est la conservation de la biodiversité au bénéfice de l'être humain et de la nature en finançant, en mobilisant et en renforçant nos partenaires et la communauté de la conservation. La fondation MAVA souhaite offrir un futur où la biodiversité s'épanouit, surtout dans la région méditerranéenne, la zone côtière d'Afrique de l'Ouest et la Suisse ; où l'économie mondiale soutient la prospérité humaine et une planète en bonne santé ; et où la communauté de la conservation se développe.

### Évaluation des actifs durables (SAVi) du parc éolien de Taïba N'Diaye au Sénégal : Gros plan sur les infrastructures énergétiques

juin 2019

#### Siège de l'IISD

111 Lombard Avenue, Suite 325  
Winnipeg, Manitoba  
Canada R3B 0T4

**Tel:** +1 (204) 958-7700

**Website:** [www.iisd.org](http://www.iisd.org)

**Twitter:** @IISD\_news

#### Website:

[mava-foundation.org](http://mava-foundation.org)



## À propos de la méthodologie SAVi

La méthodologie SAVi est un service de simulation qui permet aux gouvernements et aux investisseurs d'évaluer les risques et les facteurs externes affectant la performance de projets d'infrastructures.

La SAVi présente les caractéristiques distinctives suivantes :

- **Évaluation** : la méthodologie SAVi permet d'évaluer, en termes financiers, les risques significatifs aux niveaux environnemental, social et économique et les facteurs externes de projets d'infrastructures. Ces variables ne sont pas prises en compte dans les analyses financières conventionnelles.
- **Simulation** : la méthodologie SAVi combine les résultats de la simulation de la pensée systémique et de la dynamique des systèmes avec une modélisation des finances d'un projet. Nous collaborons avec les propriétaires d'actifs afin d'identifier les risques qui sont significatifs pour leurs projets d'infrastructures, puis nous élaborons des cas de figure pertinents à des fins de simulation.
- **Personnalisation** : la méthodologie SAVi est adaptée aux spécificités d'un projet d'infrastructures.

[www.iisd.org/savi](http://www.iisd.org/savi)



## Table des matières

<b>1.0 Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>2.0 Effets externes, scénarios et risques</b> .....	<b>2</b>
2.1 Effets externes.....	2
2.2 Comparaison des technologies.....	3
2.3 Risques liés au changement climatique .....	4
2.4 Scénarios .....	4
<b>3.0 Résultats</b> .....	<b>6</b>
3.1 Analyse coûts/bénéfices (ACB) intégrée .....	6
3.2 Présentation des résultats.....	6
3.3 Analyse financière.....	9
<b>4.0 Comment la méthodologie SAVi a-t-elle été adaptée au parc éolien Taïba N'Diaye ?</b> .....	<b>12</b>
4.1 Théorie des systèmes et dynamique des systèmes.....	12
4.2 Aperçu du modèle.....	13
4.3 Méthode.....	14
4.4 Indicateurs révélant les dépenses, coûts évités et bénéfices ajoutés .....	15
4.5 Aperçu du modèle : financement du projet .....	16
<b>5.0 Conclusions</b> .....	<b>17</b>
<b>Références</b> .....	<b>18</b>
<b>Annexe I. Coûts et revenus par actif (millions DE FRANCS CFA)</b> .....	<b>19</b>

## Liste des figures

Figure 1. Emplacement du projet du parc éolien Taïba N'Diaye .....	1
Figure 2. DBC pour une évaluation énergétique.....	14

## Liste des tableaux

Tableau 1. Effets externes pris en compte dans l'évaluation SAVi.....	2
Tableau 2. Scénarios simulés utilisés dans le cadre de l'évaluation énergétique SAV du parc éolien Taïba N'Diaye.....	5
Tableau 3. LCOE ventilé par technologie et scénario (Francs CFA/MWh).....	6
Tableau 4. Ventilation du LCOE par catégorie et technologie (Francs CFA/MWh) .....	7
Tableau 5. Répartition de l'ACB par technologie.....	8
Tableau 6. Création d'emplois et émissions de CO <sub>2</sub> eq.....	9
Tableau 7. Scénarios simulés utilisés dans le cadre de l'évaluation énergétique SAVi du parc éolien Taïba N'Diaye.....	9
Tableau 8. Indicateurs de rentabilité.....	10
Tableau 9. Taux de crédit.....	10
Tableau 10. Relations de cause à effet et polarité.....	12



## Glossaire

**Agrégation/désagrégation spatiale** : des modèles de simulation agrégée fournissent une seule valeur correspondant à une variable simulée donnée (par exemple, population et terres agricoles). En revanche, les modèles spatiaux produisent des résultats à l'échelle humaine et les intègrent à une carte présentant, par exemple, la répartition géographique de la population et des terres agricoles à l'intérieur d'un pays.

**Boucle de rétroaction** : selon la définition de Roberts et al. (1983), il s'agit d'un « processus par lequel une cause initiale se répercute dans une chaîne de cause à effet, pour finalement se réaffecter elle-même ».

**Cycle politique** : un processus d'élaboration de politiques, comprenant généralement l'identification de problèmes, la formulation de politiques, l'évaluation de politiques, des prises de décisions, l'application de politiques et le suivi-évaluation de politiques.

**Désagrégation verticale/horizontale de modèles** : des modèles désagrégés verticalement représentent un haut niveau de détail sectoriel ; en revanche, les modèles horizontaux comprennent plusieurs secteurs et les liens qui existent entre eux (à un moindre degré de détail pour chacun des secteurs représentés).

**Dynamique des systèmes (DS)** : une méthodologie conçue pour créer des modèles descriptifs axés sur l'identification de relations de cause à effet ayant une incidence sur la création et l'évolution des problèmes examinés. Elle s'appuie essentiellement sur les boucles de rétroaction, les retards et la non-linéarité, à travers la représentation explicite des stocks et des flux.

**Économétrie** : une méthodologie qui mesure la relation entre deux ou plusieurs variables, en menant une analyse statistique de données historiques et en déterminant la corrélation entre des variables sélectionnées spécifiques.

**Économie verte** : une économie qui aboutit à une amélioration du bien-être humain et de l'équité sociale, tout en réduisant de manière significative les risques environnementaux et les pénuries écologiques (Programme des Nations Unies pour l'environnement [PNUE], 2011).

**Indicateur** : instrument qui fournit une indication, généralement utilisé pour décrire et/ou donner un ordre de grandeur à une condition donnée.

**Méthodologie** : un ensemble de connaissances sur lequel repose la création de différents types de modèles de simulation. Elle comprend des fondements théoriques de l'approche et englobe souvent des analyses et des instruments qualitatifs et quantitatifs.

**Modèle de simulation** : un modèle est à la fois une simplification de la réalité, une représentation du fonctionnement du système et une analyse de la structure et des données (du système). Un modèle quantitatif est construit en faisant appel à une ou plusieurs méthodologies spécifiques, en tenant compte de leurs points forts et leurs points faibles respectifs.

**Optimisation** : une simulation dont l'objectif est d'identifier la meilleure solution (par rapport à certains critères) parmi un ensemble d'alternatives disponibles.

**Planification du développement** : un ensemble de processus publics et privés de planification et de prises de décision (allant, par exemple, d'un plan national d'affectation des terres au processus budgétaire annuel, et incluant des projets d'infrastructures ainsi que des exercices de formulation de politiques sectorielles) qui impliquent généralement le besoin de faire des compromis entre les demandes concurrentes en ressources rares et qui ont aussi des conséquences sur l'environnement.

**Scénario** : des attentes concernant d'éventuels événements futurs, utilisées pour analyser les réponses potentielles à ces éventualités nouvelles et futures. L'analyse de scénarios est donc un exercice spéculatif au cours duquel sont identifiées, expliquées et analysées plusieurs alternatives d'éventualités futures afin de discuter de leurs possibles origines et des conséquences que ces futures pistes pourraient avoir sur notre système (par exemple, un pays ou une entreprise).

**Système d'information géographique (SIG)** : un système conçu pour recueillir, stocker, manipuler, analyser, traiter et présenter tous types de données géographiques. En d'autres termes, un SIG mêle la cartographie, l'analyse statistique et l'informatique.



**Taux de couverture de la dette (TCD) :** une mesure de la trésorerie disponible pour payer les obligations actuelles liées à la dette. Le taux exprime les revenus nets d'exploitation sous la forme d'un multiple des obligations liées à la dette arrivant à échéance au cours de l'année, et inclut les intérêts et le capital.

**Taux de couverture sur la durée d'emprunt (LLCR) :** un taux financier que l'on utilise pour estimer la capacité de l'entreprise emprunteuse à rembourser un prêt en cours. On le calcule en divisant la VAN de la trésorerie disponible pour rembourser la dette par le montant des créances prioritaires en cours.

**Taux de rendement interne (TRI) :** un indicateur des perspectives de rentabilité d'un investissement potentiel. Le TRI est le taux d'actualisation qui ramène à zéro la valeur actuelle nette (VAN) de tous les flux de trésorerie d'un projet donné. Les flux de trésorerie, déduction faite des frais de financement, nous donnent le TRI des fonds propres.

**Transparence du modèle :** un modèle transparent est un modèle pour lequel des équations sont disponibles et facilement accessibles, ce qui permet d'associer directement la structure au comportement (c'est-à-dire, les résultats numériques).

**Valeur actuelle nette (VAN) :** la différence entre la valeur actuelle des entrées de trésorerie, déduction faite des coûts de financement, et la valeur actualisée des sorties de trésorerie. Elle permet d'analyser la rentabilité d'un investissement ou d'un projet potentiel.

**Validation du modèle :** le processus consistant à décider si la structure (c'est-à-dire, les équations) et le comportement (c'est-à-dire, les résultats numériques) sont acceptables ou non pour décrire les mécanismes de fonctionnement sous-jacents du système et des données.

**Variables de stock et de flux :** une variable de stock représente une accumulation et se mesure à un moment précis. Une variable de flux est le taux de changement du stock et se mesure sur un intervalle de temps donné.



## Liste des abreviations

<b>ACB</b>	Analyse coûts/bénéfices
<b>BAU</b>	Business as usual (Maintien du statu quo)
<b>BOS</b>	Bureau Opérationnel du Suivi
<b>DBC</b>	Diagramme de boucles causales
<b>CO<sub>2eq</sub></b>	Équivalent dioxyde de carbone
<b>FOL</b>	Fioul lourd
<b>SAVi</b>	Outil d'évaluation des actifs durables
<b>TCD</b>	Taux de couverture de la dette
<b>ETP</b>	Équivalent temps plein
<b>PIB</b>	Produit intérieur brut
<b>TRI</b>	Taux de rendement interne des fonds propres
<b>LCOE</b>	Coût moyen actualisé de l'électricité
<b>LLCR</b>	Taux de couverture sur la durée d'emprunt
<b>mn</b>	Million
<b>VAN</b>	Valeur actuelle nette
<b>E&amp;M</b>	Exploitation et maintenance/entretien
<b>PV</b>	Photovoltaïque



## 1.0 Introduction

Le Bureau Opérationnel du Suivi (BOS), agence exécutive chargée du suivi du Plan Sénégal Émergent, a sollicité la conduite d'une évaluation SAVi du parc éolien Taïba N'Diaye. Ce parc éolien est desservi par 35 km de routes internes reliant ses 48 éoliennes. Une fois totalement opérationnel, il permettra d'injecter 158,7 MW d'électricité dans le réseau sénégalais. La région de Thiès au Sénégal a été choisie pour accueillir le parc éolien, au nord-ouest de Tivaouane (figure 1.). Les éoliennes seront installées sur d'anciennes terres agricoles. Les quelque 49,5 ha de terrain utilisés pour le projet ont été acquis auprès de la municipalité de Taïba N'Diaye dans le cadre d'un bail de location à long terme. La durée de vie du projet est de 20 ans.

D'après les documents élaborés par le BOS, le projet coûtera au total près de 185 milliards de francs CFA (330,36 millions de dollars US) sur une période de 20 ans, déduction faite des frais de financement. Le coût d'investissement attendu du projet s'élève à 124,5 milliards de francs CFA (222,4 millions de dollars US) répartis sur trois ans. Il est prévu que le coût variable se chiffre à 7 495 francs CFA par MWh (13 dollars US par MWh). Ces estimations ont été calculées à partir des *Perspectives énergétiques mondiales pour 2014 de l'Agence internationale de l'énergie* pour des projets éoliens terrestres implantés en Afrique. Appliquer les meilleures pratiques du secteur suppose que les investissements seront financés à hauteur de 30 % par des fonds propres et les 70 % restants par la dette à long terme. .

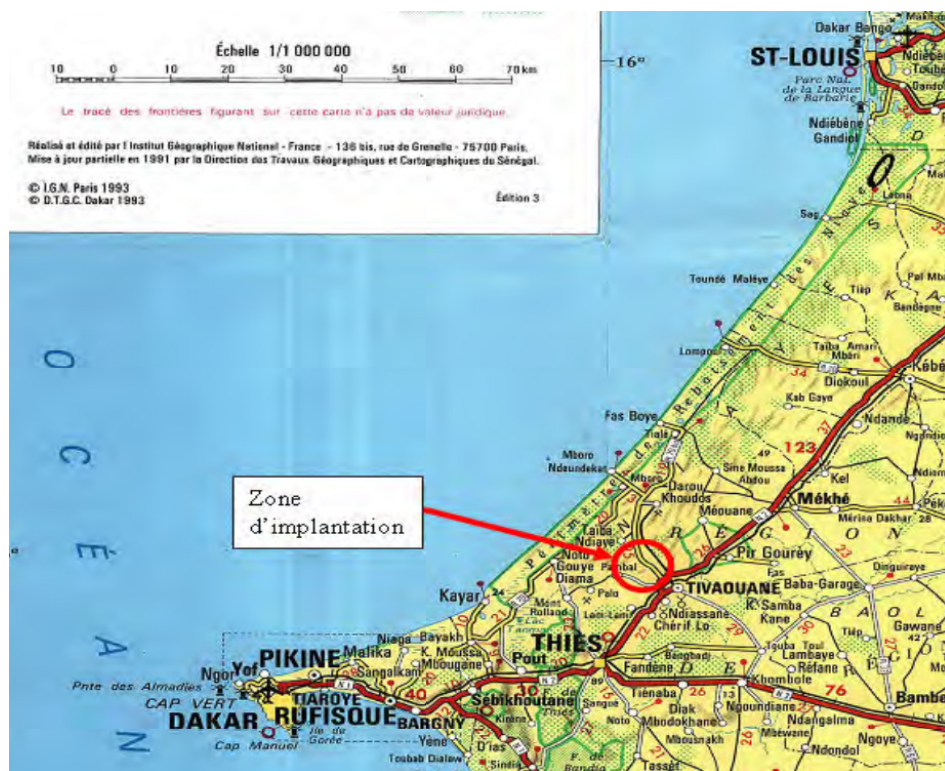


Figure 1. Emplacement du projet du parc éolien Taïba N'Diaye

Source : Cabinet d'Éco-conseil et d'Études, 2015.





## 2.0 Effets externes, scénarios et risques

L'évaluation SAVi comporte :

- une évaluation des huit effets externes liés au projet ;
- une simulation avec trois scénarios : un scénario « Business as usual » (BAU) ; un scénario de risques climatiques et un scénario qui tient compte de la valeur des effets externes et des risques dits climatiques ;
- pour chaque scénario, une comparaison du coût moyen actualisé de l'électricité (LCOE) éolienne par rapport à deux autres technologies utilisées pour la production électrique : le charbon et le fioul lourd (FOL) ;
- une comparaison de la quantité de tonnes émises de dioxyde de carbone et la création d'emplois dans les secteurs de l'éolien, du charbon et du FOL ;
- une évaluation du poids des effets externes dans les coûts totaux (répartition de l'analyse coûts/bénéfices dans la méthodologie SAVi) ;
- une estimation de l'impact des effets externes et des scénarios de risques climatiques sur les indicateurs traditionnels de financement des projets.

### 2.1 Effets externes

L'évaluation SAVi tient compte du chiffrage des effets externes liés au projet. Le tableau 1 énumère tous les effets externes retenus pour l'évaluation. La monétisation de ces coûts et avantages se fonde en grande partie sur l'évaluation de l'impact environnemental et social du parc éolien terrestre Taïba N'Diaye (Cabinet d'Éco-conseil et d'Études, 2015). Comme la plupart des impacts concernent la zone occupée par le parc éolien, ces coûts sont calculés au prorata pour la production d'électricité au charbon et au FOL en fonction de la superficie occupée par le type d'installation considéré.

**Tableau 1. Effets externes pris en compte dans l'évaluation SAVi**

Effets externes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dépenses discrétionnaires découlant des revenus de la main-d'œuvre</li> <li>• Coût d'occupation des sols issus de la production agricole</li> <li>• Coût de la pollution sonore</li> <li>• Coûts des impacts sur les oiseaux et sur la faune</li> <li>• Coûts des accidents</li> <li>• Coût de l'électrification</li> <li>• Coût social du carbone</li> </ul>
-----------------	--

#### *Dépenses discrétionnaires découlant des revenus de la main-d'œuvre*

Les dépenses discrétionnaires provenant des revenus de la main-d'œuvre correspondent au montant de l'argent qui est réinjecté dans l'économie sous forme de consommation supplémentaire. Les dépenses discrétionnaires sont censées représenter une part des revenus annuels de la main-d'œuvre (30 %). Cette approche permet d'estimer les impacts socio-économiques bénéfiques associés à la création d'emplois et détermine le rendement économique et social attendu d'un actif. Dans cette évaluation, le revenu discrétionnaire pris en compte est lié à l'emploi que créent non seulement la production d'énergie, mais également la construction et l'entretien des routes (d'après Bassi, McDougal et Uzsoki, 2017a, 2017b). Les dépenses discrétionnaires dans cette évaluation SAVi ont trait aux dépenses de revenus supplémentaires qui sont engagées pour la construction et l'entretien du parc éolien, ainsi que pour l'entretien des routes.



### **Coût d'occupation des sols issus de la production agricole**

Le coût de l'usage foncier reflète le coût imputé à l'utilisation de la terre pour la production d'électricité par opposition à la production agricole. La superficie consacrée à la centrale de production d'électricité est multipliée par une valeur moyenne ajoutée à un multiplicateur par hectare de la production agricole pour obtenir la valeur ajoutée annuelle perdue attribuable à l'occupation des sols. Elle inclut également la perte de production agricole.

La création du parc éolien réduit la superficie des terres qui peuvent être utilisées pour la production agricole, ce qui réduit la valeur ajoutée totale de la production agricole dans la région. Ce coût constitue un effet externe négatif qui reflète l'impact de la production d'électricité sur la disponibilité des terres pour la production agricole.

### **Coût de la pollution sonore**

Le coût de la pollution sonore intervient lors de la phase de construction du projet. Cette pollution est due à une forte densité circulatoire et aux engins de chantier. Par ailleurs, des mesures de renforcement des capacités sont menées pour sensibiliser le personnel et faire davantage respecter les limitations de vitesse et les instructions régissant la réglementation et la signalisation routières.

### **Coûts des impacts sur les oiseaux et sur la faune**

Les parcs éoliens ont une incidence sur la mortalité aviaire ; la présence de nouvelles infrastructures dans les zones de nidification ou de reproduction peut avoir un impact sur la faune. La région de Taïba N'Diaye compte une population d'oiseaux peu abondante et ne constitue pas un lieu de reproduction pour les espèces en voie de disparition, de sorte que les répercussions sur la faune de la région restent minimales. Cette catégorie d'effets externes tient compte du coût de la mortalité des oiseaux en multipliant le nombre d'oiseaux tués par une valeur hypothétique par oiseau.

### **Coûts des accidents**

Le coût des accidents correspond au coût des dégradations subies par le capital bâti ou les ressources humaines au cours de la durée de vie du projet. Toutes sortes d'accidents peuvent se produire dans un parc éolien : pales brisées, chutes de pylônes, rotor en feu, pollution environnementale, transport routier de la turbine, impacts de foudre. Le coût des accidents représente les coûts projetés des sinistres survenus sur le parc éolien au cours de sa durée de vie. Les coûts sont ajustés en proportion pour la production d'électricité utilisant du charbon et du FOL en fonction de la superficie totale utilisée pour la centrale.

### **Coût de l'électrification**

Indépendamment de la construction du parc éolien, les communautés voisines seront raccordées au réseau électrique. Des investissements sont prévus au cours des prochaines années tant pour relier ces communautés au parc éolien qu'au réseau électrique local. Il conviendra de mettre en place une structure de dialogue entre les autorités, la population environnante et les soumissionnaires pour répartir leur contribution aux coûts de l'électrification. L'électrification des villages voisins entraînera vraisemblablement une augmentation de la productivité et de la qualité de vie. Cet avantage social n'est pas chiffré dans cet effet externe.

### **Coût social du carbone**

Le coût social du carbone représente le coût économique d'une tonne supplémentaire de dioxyde de carbone ou son équivalent. On peut le considérer comme la valeur actualisée du bien-être économique obtenu à partir d'une unité supplémentaire de dioxyde de carbone émis (Nordhaus, 2017). On estime le coût social du carbone à 31 dollars US par tonne d'émissions d'équivalent dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>eq) générées.

## **2.2 Comparaison des technologies**

Le BOS et l'Institut international du développement durable ont décidé de comparer les coûts et les avantages du projet éolien aux coûts et aux avantages de deux autres technologies actuellement utilisées pour fournir de l'électricité à la population : la production électrique à base de FOL et les centrales thermiques au charbon.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pour simplifier, ces trois options technologiques sont appelées « vent », « charbon » et « FOL » dans les sections suivantes.



Il convient de noter d'emblée que ces deux technologies soulèvent un certain nombre de questions dans le contexte du Sénégal et que l'analyse intégrée coûts/bénéfices (ACB) et l'analyse financière de la méthodologie SAVi ne permettent pas de toutes les cerner. Elles sont toutefois importantes pour comprendre le contexte de cette analyse SAVi :

- **Charbon** : la seule centrale au charbon du Sénégal à ce jour est la centrale électrique de Sendou, un projet qui, pendant sa phase de préparation et de construction, a fait les frais de nombreux retards, de troubles sociaux et de plusieurs plaintes pour violation des normes environnementales, sociales et relatives aux droits de l'homme. Le projet s'est donc avéré très coûteux et il est peu probable que le Sénégal envisage un autre projet charbonnier dans un avenir proche (Centre de ressources sur les entreprises et les droits de l'homme, date inconnue ; Review of Business and Technology [Revue des affaires et des technologies], 2017 ; The Center for Media and Democracy [Centre pour les médias et la démocratie], 2019). En outre, le charbon est expédié par voie maritime et transporté par voie terrestre jusqu'à la centrale à charbon. Les coûts financiers ainsi que la pollution et les émissions causées par les infrastructures de transport nécessaires (ports et routes) rendent la centrale au charbon encore plus chère. Ces coûts ne sont pas pris en compte dans le comparateur des technologies dans l'analyse SAVi.
- **Fioul lourd** : le FOL bénéficie de subventions importantes au Sénégal (Saïd Ba, 2018). Le coût d'investissement de la production d'électricité à partir de FOL est établi sur la base de cette subvention.

## 2.3 Risques liés au changement climatique

### *Risque physique : Variations de température*

Les sources d'énergie renouvelables sont tributaires des ressources naturelles telles que le vent, le rayonnement solaire et les écoulements d'eau, tandis que l'efficacité des centrales thermiques dépend de la température extérieure et de la disponibilité de l'eau pour le refroidissement (Ministère de l'Énergie des États-Unis, 2015). Si la température extérieure moyenne augmente, la production thermique perd en efficacité, ce qui signifie qu'il faut plus de combustible pour produire la même quantité d'électricité. Toutes choses étant égales par ailleurs, le coût total de la production d'électricité augmentera par rapport au scénario sans impact climatique.

### *Risque transitoire : Changement de politique*

Les risques transitoires englobent des paramètres dépendant du contexte politique. Dans le cas des combustibles fossiles, l'introduction d'une taxe carbone se répercuterait considérablement sur les coûts de production de l'électricité, tandis que les coûts de production d'énergie renouvelable ne seraient pas affectés.

## 2.4 Scénarios

Le tableau 2 donne un aperçu des scénarios simulés utilisés dans le cadre de l'évaluation SAVi du parc éolien Taïba N'Diaye. Les résultats sont présentés en fonction de ces scénarios et les différences sont mises en évidence.

**Tableau 2. Scénarios simulés utilisés dans le cadre de l'évaluation énergétique SAVi du parc éolien Taïba N'Diaye**

Scénario	Hypothèses	Paramètres	Vent	FOL	Charbon
Scénario 0 : niveau de référence	<ul style="list-style-type: none"> <li>Évaluation conventionnelle (investissement, coûts de l'E&amp;M et du combustible, frais de financement)</li> </ul>	Coût d'investissement	1,45 mn de dollars US	1,07 mn de dollars US	1,3 mn de dollars US
		E&M	36 920 de dollars US (2018)	20 000 de dollars US (2018)	42 670 de dollars US (2018)
			32 870 de dollars US (2035)	20 000 de dollars US (2035)	5 190 de dollars US (2035)
		Coût du combustible	-	1,02 dollar US/L	68 dollars US/tonne
		Facteur de charge	28,8 %	42 %	60 %
Scénario 1 : risques climatiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>Évaluation conventionnelle</li> <li>Impact d'une hausse des températures de 1,5 °C</li> <li>Risques transitoires (taxe carbone)</li> </ul>	Impacts climatiques sur le facteur de charge	-	-0,75 %	-0,75 %
		Taxe carbone par MWh	5,5 dollars US/tonne de CO <sub>2</sub> (2016) 7,7 dollars US/tonne de CO <sub>2</sub> (2020) 17,6 dollars US/tonne de CO <sub>2</sub> (2030) 27,5 dollars US/tonne de CO <sub>2</sub> (2035)		
Scénario 2 : risques climatiques et effets externes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Évaluation conventionnelle</li> <li>Impact d'une hausse des températures de 1,5 °C</li> <li>Risques transitoires (taxe carbone)</li> <li>Évaluation des effets externes</li> </ul>		Dans ce scénario, les valeurs des effets externes (figurant dans le tableau 1) sont ajoutées au scénario 1.		

Note: mn = million; E&M = Exploitation et maintenance/entretien ; L = litre



## 3.0 Résultats

### 3.1 Analyse coûts/bénéfices (ACB) intégrée

Points à retenir :

- L'évaluation de l'ACB conventionnelle produit des résultats favorables au charbon et à l'énergie éolienne. Le FOL obtient des résultats défavorables en raison des coûts élevés du combustible.
- La prise en compte des impacts climatiques, des risques transitoires et des effets externes dans l'évaluation montre que les effets externes négatifs liés au FOL et au charbon sont deux à trois fois plus élevés que ceux liés au vent.
- Tout bien considéré, le parc éolien devrait être l'option la plus bénéfique à la région de Taïba N'Diaye, car il minimise les impacts environnementaux tout en maximisant les avantages socio-économiques.
- L'énergie éolienne optimise la création d'emplois et stimule les dépenses locales, tout en réduisant au minimum l'occupation des sols, la consommation d'eau, les émissions et les perturbations routières.

### 3.2 Présentation des résultats

Le tableau 3 présente le coût moyen actualisé de l'électricité (LCOE) correspondant à chaque technologie de production d'énergie et à chaque scénario. L'évaluation prévoit une durée de vie de 20 ans pour les éoliennes terrestres et de 40 ans pour la production de charbon et de FOL. Les résultats indiquent que, dans le scénario 0, l'évaluation traditionnelle de référence, la production d'énergie par le charbon est moins coûteuse que par le vent, à 33 452 francs CFA (57 dollars US) par MWh par rapport à 43 337 francs CFA (74 dollars US) par MWh. Bien que le FOL soit largement utilisé au Sénégal, il n'est pas une option financièrement intéressante pour produire une grande quantité d'électricité. Le coût de l'électricité produite à partir de FOL s'élève à 145 659 francs CFA (249 dollars US) par MWh. Lorsque l'on tient compte des risques climatiques et des effets externes (scénarios 1 et 2), on constate que le coût de l'éolien diminue à 43 266 francs CFA (74 dollars US) par MWh en raison des effets externes positifs liés à la technologie. Le coût de la production d'électricité à partir du charbon monte à 52 998 francs CFA (91 dollars US) par MWh en raison des effets externes négatifs tels que le coût social du carbone. Une ventilation complète du coût des risques climatiques et des effets externes est fournie dans le tableau 4.

**Tableau 3. LCOE ventilé par technologie et scénario (Francs CFA/MWh)**

LCOE par scénario	Vent	FOL	Charbon
Scénario 0 : niveau de référence	43 337	145 659	33 452
Scénario 1 : risques climatiques	43 337	151 481	40 798
Scénario 2 : risques climatiques et effets externes	43 266	155 898	52 998

Dans le tableau 4, les frais de financement sont moindres pour le charbon à 1 652 francs CFA (2,80 dollars US) par MWh, suivi du FOL à 1 966 francs CFA (3,40 dollars US) par MWh pour finalement atteindre les 7 510 francs CFA (12,90 dollars US) par MWh pour le projet d'énergie éolienne. Si le financement du parc éolien est aussi onéreux, cela tient au coût élevé en investissement du projet. Pour ce qui est des effets externes, le tableau 4 indique que le coût social du carbone pour le FOL et le charbon est beaucoup plus important que pour l'énergie éolienne. Sur le plan des effets externes positifs, nous constatons que les dépenses discrétionnaires découlant des emplois supplémentaires créés par le projet énergétique sont plus élevées pour l'énergie éolienne que pour le FOL et le charbon. Les valeurs de ces effets externes positifs et négatifs, ainsi que le coût des risques climatiques, démontrent que le projet éolien offre plus d'avantages et, en fin de compte, affiche un LCOE inférieur par rapport aux autres technologies énergétiques.

**Tableau 4. Ventilation du LCOE par catégorie et technologie (Francs CFA/MWh)**

LCOE ventilé par position des coûts	Vent	FOL	Charbon
<b>Coûts liés au projet</b>			
Dépenses en capital	23 461	11 746	9 990
Préparation du projet			
Coût du compactage du sol	1,9	2,8	1,9
Coût d'enlèvement de la végétation	1,9	2,8	1,9
Coûts liés à la détérioration des routes	0,3	0,4	0,3
Phase d'exploitation			
Endommagement des routes	0,2	0,3	0,2
Activités préparatoires	1,2	1,7	1,2
Coût d'E&M	7 495	609	5 362
Coût du combustible	0	126 580	11 692
Frais de financement	7 510	1 966	1 652
Fiscalité liée au projet	4 865	4 750	4 750
<b>Sous-total (1)</b>	<b>43 337</b>	<b>145 659</b>	<b>33 452</b>
<b>Risques liés au changement climatique</b>			
Impacts climatiques	0	3 308	306
Taxe carbone	0	2 514	7 040
<b>Sous-total (2)</b>	<b>0</b>	<b>5 822</b>	<b>7 346</b>
<b>Effets externes</b>			
Planification et phase de construction			
Dépenses discrétionnaires découlant des revenus de la main-d'œuvre (parc éolien)*	(365,2)	(110,3)	(82,8)
Coûts d'occupation des sols issus de la production agricole	42,7	65,5	45,9
Coûts de la pollution sonore	0,4	0,5	0,4
Phase d'exploitation			



LCOE ventilé par position des coûts	Vent	FOL	Charbon
Coûts des impacts sur les oiseaux et sur la faune	1,3	0,7	0,5
Coûts des accidents	1,7	0	0
Coût de l'électrification	0,9	1,3	0,9
Coût social du carbone	363	4 459	12 355
Dépenses discrétionnaires découlant des revenus de la main-d'œuvre (entretien des routes)*	(115)	(169,4)	(119)
<b>Sous-total (3) des effets externes du projet</b>	<b>(70)</b>	<b>4 247,3</b>	<b>12 200,9</b>
<b>LCOE total, effets externes et risques climatiques inclus</b>	<b>43 266</b>	<b>155 728</b>	<b>52 998</b>

\*Les effets externes positifs sont indiqués en tant que valeur négative, car ils réduisent le LCOE en engrangeant des bénéfices sociaux ou environnementaux.

Les parts de l'analyse coûts/bénéfices de la méthodologie SAVi, présentées dans le tableau 5, correspondent à la part des effets externes dans les coûts totaux déclarés pour chaque évaluation SAVi+ (scénario 3). Ces parts illustrent le pourcentage détenu par les effets externes dans les coûts totaux à condition de les considérer en combinaison avec les coûts d'investissement, d'E&M et de combustible. Pour le charbon et le FOL, les effets externes représentent 23 pour cent et 2,7 pour cent du coût total, respectivement. Dans le cadre du parc éolien, les effets externes positifs tels que les recettes fiscales, les revenus et la valeur ajoutée provenant de l'emploi sur la durée de vie du projet l'emportent sur les effets externes négatifs et contribuent à réduire le coût en capital du projet. Dans le cas du projet de parc éolien Taïba N'Diaye, la valeur des effets externes positifs conduit à une « réduction nette » des coûts de production d'électricité.

**Tableau 5. Répartition de l'ACB par technologie**

Portions de l'ACB (SAVi)	Vent	FOL	Charbon
Investissement, E&M et combustible	100,2 %	97,3 %	77,0 %
Effets externes	(0,2 %)	2,7 %	23,0 %

Concernant les emplois directs liés à la production d'électricité, l'évaluation SAVi indique que l'éolien terrestre devrait générer au moins 66 emplois équivalents temps plein (ETP) par an, ce qui est beaucoup plus élevé que les emplois créés par la production de charbon (11 emplois) et de FOL (15 emplois). L'implantation du parc éolien Taïba N'Diaye pourrait contribuer à éviter que soient rejetées dans l'atmosphère 2,1 à 6 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>eq, respectivement, entre 2019 et 2042 si le FOL ou le charbon était utilisé à la place. Cela équivaut à un coût social actualisé cumulé et finalement évité du carbone d'environ 23,7 millions de francs CFA (40 600 dollars US) et 65,6 millions de francs CFA (112 400 dollars US). Le tableau 6 donne un aperçu de l'emploi par année, des émissions cumulatives de CO<sub>2</sub>eq résultant de l'utilisation de combustibles fossiles et des émissions cumulatives de CO<sub>2</sub>eq sur le cycle de vie.

**Tableau 6. Création d'emplois et émissions de CO<sub>2</sub>eq**

Catégorie	Vent	FOL	Charbon
Emploi (ETP/an)	66	15	11
Émissions — combustible (mn tonnes)	0,0	2,1	6,0
Émissions — cycle de vie (mn tonnes)	0,1	2,2	6,1

### 3.3 Analyse financière

L'analyse financière démontre l'impact financier des effets externes et des risques climatiques pour les projets éoliens terrestres, le FOL et le charbon. Les résultats de l'analyse sont divisés en deux groupes : les indicateurs de rentabilité (tableau 8) et les taux de crédit (tableau 9). Même si le taux de rendement interne (TRI) et la valeur actuelle nette (VAN) démontrent l'attractivité financière du projet, le taux de couverture de la dette (TCD) et le taux de couverture de la durée d'emprunt (LLCR) sont surtout utilisés par les prêteurs pour évaluer la capacité du projet à rembourser sa dette.

L'analyse financière comprend trois scénarios, semblables à l'ACB intégrée :

- Le scénario de référence ne comprend que les coûts liés au projet, comme les dépenses en capital et les frais d'exploitation.
- Le 1er scénario prolonge le scénario de référence en incluant également l'impact des risques liés au climat, tant physiques que transitoires.
- Le 2e scénario s'appuie sur le scénario 1 en intégrant également les différents effets externes environnementaux, sociaux et économiques mesurés par la méthodologie SAVi

**Tableau 7. Scénarios simulés utilisés dans le cadre de l'évaluation énergétique SAVi du parc éolien Taïba N'Diaye**

Scénario	Hypothèses
Scénario 0 : niveau de référence	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Évaluation conventionnelle (investissement, coûts de l'E&amp;M et du combustible)</li> </ul>
Scénario 1 : risques climatiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Évaluation conventionnelle</li> <li>• Impact d'une hausse des températures de 1,5 °C</li> <li>• Risques transitoires (taxe carbone)</li> </ul>
Scénario 2 : risques climatiques et effets externes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Évaluation conventionnelle</li> <li>• Impact d'une hausse des températures de 1,5 °C</li> <li>• Risques transitoires (taxe carbone)</li> <li>• Évaluation des effets externes</li> </ul>

#### 3.3.1 PRINCIPAUX CONSTATS

- Le vent affiche un rendement comparable à celui du charbon si l'on tient compte des effets externes et des risques climatiques. Il est important de noter que l'évaluation économique effectuée avec la méthodologie SAVi est axée sur le coût de la production d'électricité à l'échelle de la centrale. Par





conséquent, il n'inclut pas le coût de l'infrastructure et de l'approvisionnement en charbon<sup>2</sup> et en FOL (alors qu'il tient compte du coût de la construction des routes et du raccordement au réseau pour l'énergie éolienne).

- L'impact financier des effets externes environnementaux, sociaux et économiques est significatif.
- L'option du FOL est nettement moins performante que les deux autres technologies de production d'énergie et n'est pas considérée comme étant financièrement viable.

**Tableau 8. Indicateurs de rentabilité**

	Vent		FOL		Charbon	
	TRI (%)	VAN (mn de dollars US)	TRI (%)	VAN (mn de dollars US)	TRI (%)	VAN (mn de dollars US)
Scénario 0 : niveau de référence	12,17 %	156,95	Négatif	(943,67)	23,53 %	305,54
Scénario 1 : risques climatiques	12,17 %	156,95	Négatif	(1 010,30)	19,59 %	236,86
Scénario 2 : risques climatiques et effets externes	12,19 %	157,38	Négatif	(1 060,14)	13 27 %	129,64

**Tableau 9. Taux de crédit**

	Vent		FOL		Charbon	
	TCD min. (x)	LLCR min. (x)	TCD min. (x)	LLCR min. (x)	TCD min. (x)	LLCR min. (x)
Scénario 0 : niveau de référence	1,73x	2,00x	(6,98x)	(6,97x)	3,20x	3,58x
Scénario 1 : risques climatiques	1,73x	2,00x	(7,55x)	(7,54x)	2,66x	2,96x
Scénario 2 : risques climatiques et effets externes	1,73x	2,00x	(7,97x)	(7,96x)	1,83x	1,97x

**Les performances du vent sont comparables à celles du charbon lorsqu'on tient compte des risques climatiques et des effets externes.**

Selon l'évaluation financière traditionnelle (scénario 0), le TRI escompté du charbon (23,53 %) est plus élevé que celui du projet éolien terrestre (12,17 %). Cela s'explique principalement par le fait que les dépenses en capital consacrées à l'alternative prévoyant l'utilisation d'énergie renouvelable représentent plus du double des dépenses en capital du charbon.

<sup>2</sup> Le cas du charbon est particulièrement intéressant en ce qui concerne les questions de transport (normalement effectué avec des camions lourds) et les infrastructures connexes. On a pu observer que le transport par camion contribue sensiblement à la détérioration et à la désorganisation des routes, à l'augmentation du trafic et des accidents. Cette situation, également affectée par le manque d'infrastructures portuaires efficaces pour l'importation de charbon, se traduit par des coûts plus élevés.



La VAN révèle une situation similaire : le charbon est en tête avec une marge significative (305,54 millions de dollars US) par rapport au projet éolien terrestre (156,95 millions de dollars US). Enfin, des taux de crédit nettement supérieurs à 1,00x signifient qu'aucun des deux projets ne devrait avoir de problèmes de trésorerie pour rembourser le prêt avec intérêts.

Lorsque les effets potentiels du changement climatique sont pris en compte (scénario 1), la compétitivité financière du charbon se dégrade sensiblement. Ceci est dû aux coûts supplémentaires de la taxe carbone ainsi qu'à une production d'énergie sous-optimale à des températures plus élevées.

Lorsque les effets externes environnementaux, sociaux et économiques, sans oublier les risques de changement climatique, sont inclus dans le modèle (scénario 2), les éoliennes terrestres ont un rendement équivalent à celui de la centrale au charbon. En se basant uniquement sur la VAN, le choix des énergies renouvelables (157,38 millions de dollars US) surpasse même celui des énergies fossiles (129,64 millions de dollars US). **Ces observations soulignent l'importance des effets externes lorsqu'ils sont intégrés dans l'évaluation financière des projets d'infrastructures. Ces résultats démontrent également que l'option du charbon n'est pas moins coûteuse lorsqu'on procède à une analyse plus holistique.**

Il convient de noter que, s'il semble important de tenir compte des effets externes dans l'évaluation financière afin de prendre des décisions d'investissement durable, ils n'ont pas d'incidence directe sur les flux de trésorerie du projet en cours d'évaluation. Par conséquent, les indicateurs financiers calculés dans le scénario 2 représentent une vision sociétale de la performance des alternatives de projet. L'IISD est impatient de dialoguer avec le BOS sur la manière d'améliorer cette partie de l'évaluation financière.

#### *L'option du FOL est moins performante que les deux autres technologies de production d'énergie.*

La rentabilité financière de l'option du FOL est très faible dans tous les scénarios modélisés. Cela résulte du coût élevé et de l'inefficacité de la combustion du FOL à produire de l'électricité. La VAN sur la durée de vie du projet de 40 ans est éminemment négative et s'élève à environ -1 milliard de dollars US dans tous les scénarios, tous les autres indicateurs financiers présentant une situation similaire. Ces chiffres sont particulièrement frappants si l'on considère que le FOL est encore souvent utilisé pour la production d'énergie en Afrique.



## 4.0 Comment la méthodologie SAVi a-t-elle été adaptée au parc éolien Taïba N'Diaye ?

### 4.1 Théorie des systèmes et dynamique des systèmes

L'analyse SAVi s'est concentrée sur l'évaluation des perspectives et des effets externes liés au projet éolien terrestre de Taïba N'Diaye, au Sénégal. La dynamique sous-jacente du secteur de l'énergie, y compris les forces motrices et les indicateurs clés, est résumée dans le diagramme de boucles causales (DBC) présenté à la figure 1. Le DBC comprend les principaux indicateurs analysés lors de cette évaluation SAVi, leurs corrélations avec d'autres variables pertinentes dans le secteur, telles que la demande énergétique et les prix, ainsi que les boucles de rétroaction qu'ils forment. Le DBC a été élaboré et adapté au contexte local en collaboration avec les parties prenantes travaillant avec le BOS, qui a également fourni les informations nécessaires au bon déroulement de l'évaluation. Le DBC marque le point de départ de l'élaboration du modèle mathématique (stock et flux). Les résultats du modèle sont présentés dans la section 3.

#### ENCADRÉ 1. INTERPRÉTATION D'UN DBC

Les DBC comprennent des variables et des flèches (appelées « liens de cause à effet »), ces dernières reliant les variables entre elles par un signe (+ ou -) sur chaque lien pour indiquer une relation de cause à effet positive ou négative (voir le tableau 10) :

- Un lien de cause à effet de la variable A à la variable B est positif si un changement dans la variable A produit un changement dans la variable B dans la même direction.
- Un lien de cause à effet de la variable A à la variable B est négatif si un changement dans la variable A produit un changement dans la variable B dans la direction opposée.

Variable A	Variable B	Signe
↑	↑	+
↓	↓	+
↑	↓	-
↓	↑	-

Tableau 10. Relations de cause à effet et polarité

Les relations de cause à effet circulaires entre des variables forment des boucles causales, ou boucles de rétroaction. Ces boucles peuvent être positives ou négatives. Une boucle de rétroaction négative tend vers un but ou un équilibre, en équilibrant les forces dans le système (Forrester, 1961). Une boucle de rétroaction positive peut se former lorsqu'une intervention déclenche d'autres changements qui amplifient l'effet de cette intervention initiale, ce qui la renforce (Forrester, 1961). Les DBC tient également compte des retards et de la non-linéarité.

La création d'un diagramme de boucles causales a plusieurs objectifs : premièrement, il regroupe les idées, les connaissances et les opinions de l'équipe ; deuxièmement, il met en évidence les limites de l'analyse ; troisièmement, il permet à toutes les parties prenantes d'acquérir des connaissances de base-à-avancées sur les questions analysées et leurs propriétés systémiques. Il est essentiel d'avoir une compréhension commune de la résolution des problèmes qui influent sur plusieurs secteurs ou sphères d'influence, que l'on rencontre fréquemment dans des systèmes complexes. Étant donné que la constitution d'un DBC porte et repose sur des connaissances transdimensionnelles, il concourt à développer une compréhension commune des facteurs à l'origine du problème et de ceux qui pourraient mener à une solution entre toutes



les parties impliquées dans le processus décisionnel et dans la mise en œuvre, et à établir des partenariats efficaces et fructueux entre le secteur privé et le secteur public. De ce fait, la solution ne doit pas être imposée au système, mais en émerger. En d'autres termes, les interventions devraient être conçues de telle façon que le système commence à fonctionner en faveur des décideurs et des parties prenantes concernées pour résoudre le problème, plutôt que de le créer.

Dans ce contexte, le rôle des boucles de rétroaction est capital. Bien souvent, le problème émane du système même que nous avons créé, suite à une intervention extérieure ou en raison d'une conception défectueuse. Ces limites apparaissent au fur et à mesure que le système évolue en taille et en complexité. En d'autres termes, les causes d'un problème résident souvent dans les structures de rétroaction du système. Les indicateurs ne suffisent pas pour identifier ces causes et pour expliquer les événements à l'origine du problème. Nous sommes trop souvent enclins à analyser l'état actuel du système ou à étendre notre investigation à une chaîne linéaire de causes et d'effets, qui ne se recoupe pas avec elle-même, ce qui limite notre compréhension des boucles ouvertes et de la pensée linéaire.

## 4.2 Aperçu du modèle

Dans le cadre de la sécurisation de la production d'énergie pour le Sénégal, le BOS a fait appel à l'IISD pour évaluer la faisabilité de différentes options en matière de production d'électricité. Nous avons appliqué le modèle énergétique de la méthodologie SAVi pour informer les décideurs des risques potentiels et des effets externes attachés à chaque technologie. Le modèle énergétique de la méthodologie SAVi prévoit un rendement lié à l'actif qui tient compte des différents risques et effets externes au cours de sa durée de vie. L'évaluation permet de chiffrer les risques et les effets externes et fournit des informations sur les impacts sociaux et environnementaux au-delà de l'évaluation économique classique.

Outre le parc éolien terrestre prévu, le charbon vapeur et le FOL ont été inclus dans l'évaluation comme technologies appropriées compte tenu du contexte local. Pour tenir pleinement compte des incidences des technologies envisagées, il convient d'évaluer les répercussions socio-économiques et environnementales de chaque option. L'évaluation SAVi tient compte à la fois des effets externes liés aux actifs et de l'adéquation de l'investissement prévu face à l'incertitude croissante induite par les impacts du changement climatique et les évolutions démographiques.

La figure 2 représente un DBC qui retrace la dynamique derrière l'analyse du secteur de l'énergie. Il présente les variables clés qui conditionnent la construction de la centrale de production d'électricité au fil du temps, telles que la population, la demande économique d'électricité et les facteurs déterminants de l'efficacité des technologies de production d'électricité. Six grandes boucles de rétroaction déterminent la dynamique du secteur de l'énergie : les boucles R1 à R3 et B1 à B3.

- Les boucles R1 et B1 représentent l'ajustement de la capacité de production d'électricité. La capacité actuelle, renouvelable et non renouvelable, est comparée à la capacité requise pour assurer l'approvisionnement en électricité souhaité. L'écart entre la capacité actuelle et la capacité souhaitée détermine le montant des investissements nécessaires dans les différents types de technologie.
- Le niveau de capacité souhaité dépend de l'efficacité moyenne (facteur de charge moyen) du bouquet technologique actuel. Si la centrale thermique, ordinairement associée à des facteurs de charge plus élevés, augmente le facteur de charge moyen, représenté par la boucle R2, les technologies renouvelables sont moins efficaces en raison de leur dépendance, par exemple, à la lumière du soleil et à la vitesse du vent, représentées par la boucle B2. Cela indique qu'une transition vers les énergies renouvelables entraînera probablement des exigences de capacité plus élevées que dans le cas des technologies thermiques.
- Le prix de l'électricité est le troisième grand facteur qui influe sur la demande de capacité de production d'électricité, au travers de la demande de l'électricité. En supposant que les coûts intrinsèques de production demeurent constants, une production plus élevée réduira le prix de l'électricité, ce qui fera augmenter la demande et vice versa. Le renforcement de la boucle R3 tient compte de l'augmentation du prix de production de l'électricité qui surviendra si la part de la production renouvelable dans le portefeuille de production d'électricité progresse. La boucle d'équilibrage B3 fait ressortir les effets compensatoires de la production de combustibles fossiles à faible coût sur le coût de la production d'électricité et, par conséquent, sur le prix de production de l'électricité.

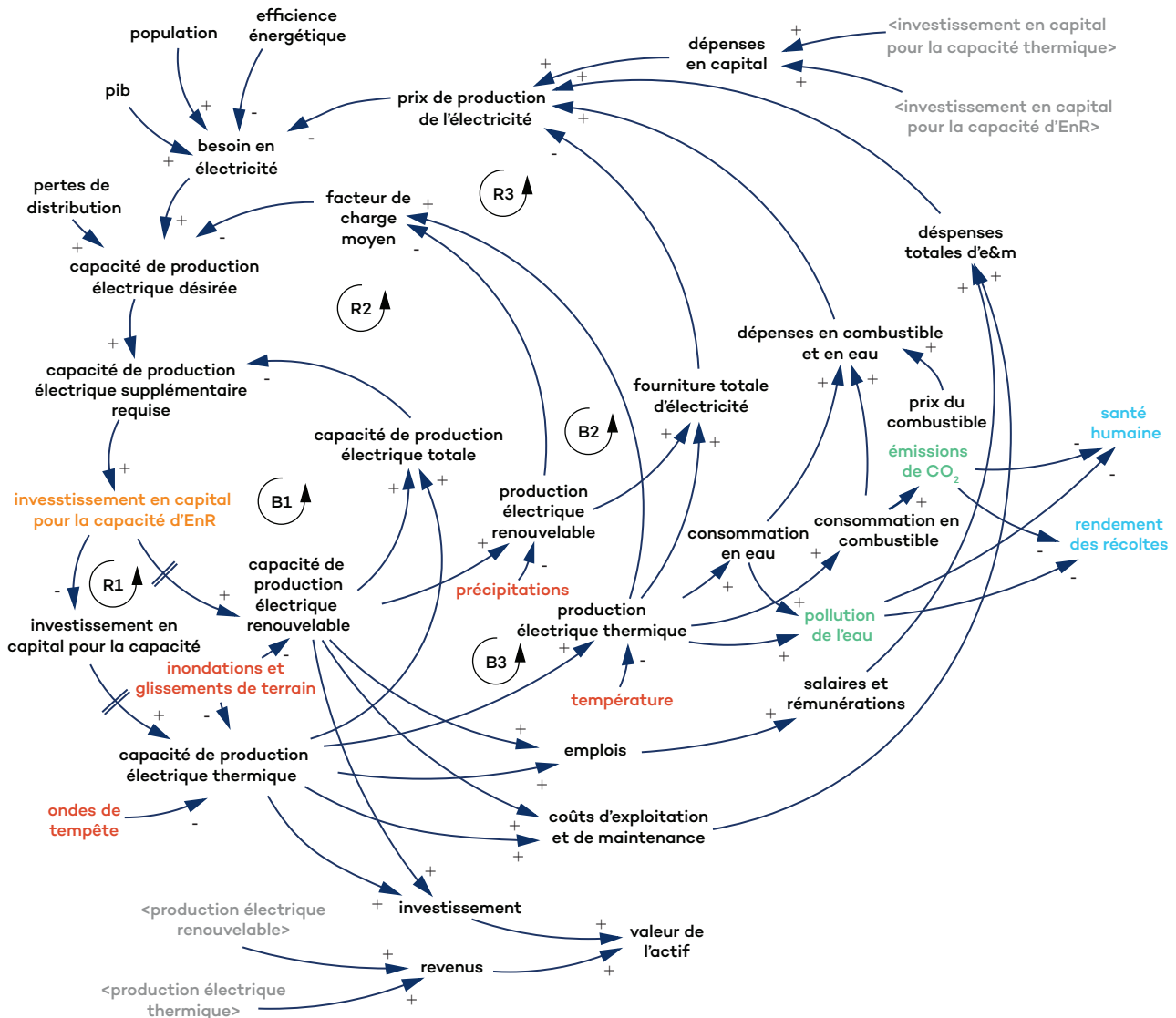


Figure 2. DBC pour une évaluation énergétique

### 4.3 Méthode

Le LCOE sert d'indicateur clé pour chacune des technologies. Cet indicateur est utile lorsqu'il s'agit de comparer le coût unitaire des différentes technologies par rapport à leur durée de vie (Agence internationale de l'énergie, 2015). On le calcule en divisant les coûts actualisés nets de production pour la durée de vie de la centrale par la production actualisée nette. Autrement dit, il correspond au résultat des coûts escomptés cumulés (unités : dollars US) divisé par la production escomptée cumulée (unité habituellement en MWh).

Pour tenir pleinement compte de l'impact de la capacité de production d'électricité, il est indispensable de considérer la centrale comme faisant partie du système plutôt que comme un élément isolé. Un modèle de dynamique des systèmes évalue et quantifie les effets externes et les risques liés aux actifs, tels que les impacts climatiques sur l'efficacité de la production, les risques transitoires (p. ex., la taxe carbone) et les impacts sanitaires des émissions de particules et autres. Ces informations sont utilisées pour compléter l'évaluation traditionnelle du LCOE et pour déterminer les « coûts sociaux, économiques et environnementaux réels » des technologies de production d'électricité. En plus du LCOE habituel, y compris les paramètres de coûts tels que l'investissement en capital, les coûts d'E&M et du combustible, un LCOE intégré est présenté qui tient compte des effets externes chiffrés et des risques associés à chaque technologie. Cette approche permet de prendre pleinement en compte les impacts liés aux actifs et fournit une vue d'ensemble des avantages et des inconvénients liés aux capacités.



Le LCOE des options de production d'électricité dépend de nombreux facteurs, tels que le montant initial des investissements, les coûts d'E&M, la production totale et la durée de vie de l'actif. Le LCOE traditionnel est calculé à partir de l'équation suivante :

$$\text{LCOE} = \frac{\sum[(\text{CAPEX}_t + \text{OPEX}_t + \text{Fuel}_t) * (1+r)^{-t}]}{\sum \text{MWh} * (1+r)^{-t}}$$

dans laquelle les paramètres correspondent à

- LCOE = coût moyen actualisé de production de 1 MWh d'électricité pendant la durée de vie de l'actif
- MWh = quantité d'électricité produite par l'actif en mégawattheure
- $(1+r)^{-t}$  = facteur d'actualisation pour l'année t pour escompter à parts égales les coûts d'investissement, d'E&M et de production
- r = taux d'actualisation appliqué pour actualiser les coûts et la production
- $\text{CAPEX}_t$  = coût d'investissement pour l'année t
- $\text{OPEX}_t$  = coût d'exploitation et de maintenance/d'entretien pour l'année t
- Combustible = coût du combustible pour l'année t

Afin d'obtenir une évaluation plus holistique, l'évaluation SAVi inclut les risques transitoires (p. ex., la taxe carbone), les risques climatiques et divers effets externes dans le calcul, en plus de l'évaluation conventionnelle. Les autres paramètres pris en compte dans cette analyse sont présentés en section 3. Ces paramètres ont été établis en collaboration avec les parties prenantes locales et les responsables de projets ; ils appartiennent à l'une des trois catégories distinctes suivantes : dépenses, coûts évités et bénéfices supplémentaires.

## 4.4 Indicateurs révélant les dépenses, coûts évités et bénéfices ajoutés

Nous avons évalué trois principaux aspects de la mise en œuvre des centrales au charbon, au FOL et à l'énergie éolienne : les dépenses, les coûts évités et les bénéfices ajoutés, les dépenses comprenant à la fois les dépenses en investissement et les frais d'E&M sur la durée de vie prévue de l'actif. L'évaluation intègre les coûts sociaux et environnementaux évités ainsi que les bénéfices ajoutés, en sus des coûts économiques plus conventionnels. L'exemple des bâtiments écoénergétiques, qui abaissent la consommation d'énergie, réduisent les frais énergétiques et limitent les émissions, illustre cette approche.

### 4.4.1 DÉPENSES

Au niveau du secteur privé, les dépenses désignent les coûts monétaires de la mise en œuvre d'un projet, tels que les coûts d'investissement, des opérations et de maintenance/entretien et les dépenses extrabudgétaires. Pour les services publics, la conformité aux normes sur les émissions pourrait par exemple impliquer l'achat de technologies d'atténuation efficaces. Les contractants tiendront compte des coûts de certaines technologies d'atténuation, des frais de certification pour une nouvelle installation de production d'électricité et des frais d'audit pour celles qui existent. Du point de vue du secteur public, les dépenses se réfèrent à l'affectation et/ou à la réaffectation de ressources financières dans le but d'atteindre un objectif politique précis — par exemple, accorder des subventions pour des investissements dans des technologies efficaces de production d'électricité afin de stimuler la construction de capacités renouvelables ou de capacités qui offrent le meilleur rapport qualité-prix selon les indicateurs déterminés.

### 4.4.2 COÛTS ÉVITÉS

L'estimation des coûts potentiels évités tient compte des résultats de la mise en œuvre réussie d'un investissement ou d'une politique. Dans le cas de la production d'électricité, les coûts évités renvoient aux économies directes découlant de l'exploitation des centrales électriques, telles que la réduction des coûts du combustible, les investissements évités dans les technologies d'atténuation ou les frais d'E&M et les dépenses en eau.



### 4.4.3 BÉNÉFICES AJOUTÉS

Parmi les bénéfices ajoutés figure la valeur monétaire des résultats économiques, sociaux et environnementaux obtenus grâce à la mise en œuvre d'investissements ou d'une politique. Les bénéfices ajoutés sont évalués en effectuant une comparaison entre le scénario qui implique des investissements et le scénario de référence, en se concentrant sur les impacts à court, moyen et long terme quel que soit le secteur ou l'acteur. Dans le cas de la capacité de production d'électricité, les bénéfices ajoutés comprennent la création d'emplois, une réduction des répercussions sanitaires des émissions, les coûts d'opportunité de l'utilisation du sol et le coût social du carbone. Cette catégorie comprend les bénéfices ajoutés générés par des investissements planifiés qui ne se présenteraient pas dans un scénario MSQ.

## 4.5 Aperçu du modèle : financement du projet

Les principaux objectifs d'un modèle de financement de projet sont les suivants : (i) identifier la structure optimale du capital, (ii) évaluer la viabilité financière du projet, et (iii) calculer le rendement escompté de l'investissement dans différents scénarios opérationnels et à risques.

1. Les commanditaires du projet s'appuient sur des modèles financiers pour déterminer quelle devrait être la répartition optimale entre les dettes et les capitaux propres utilisée dans le financement du projet. Ceci dépend en grande partie du profil de revenus et de coûts du projet, à savoir le calendrier et la taille des entrées de trésorerie lors des activités et les coûts associés dans chaque période. La plupart des projets d'infrastructures suivent ce que l'on appelle une « courbe en J » : les coûts initiaux sont élevés et les flux de revenus sont relativement faibles, mais réguliers. Le « J » indique qu'il faut plusieurs années avant que le projet n'atteigne le seuil de rentabilité et engrange un rendement de l'investissement.
2. Les modèles financiers de projets permettent également de calculer si les flux de trésorerie qu'engrange le projet suffiront pour rembourser la dette et déboucheront sur un rendement attrayant ajusté selon les risques, pour les investisseurs en titres de créance comme pour les investisseurs en fonds propres. Cette évaluation comprend le calcul d'indicateurs clés de rentabilité et de crédit, tels que le TRI, le VAN, le TCD et le LLCR. Les définitions de ces indicateurs figurent dans le glossaire joint au présent document.
3. Les modèles de financement de projet permettent également de soumettre les projets à des tests de résistance et d'évaluer comment le rendement prévu change selon le cas de certains scénarios opérationnels et à risques. Il est calculé à partir d'un « tableau de scénarios », qui modifie les hypothèses clés du projet et indique le comportement des principaux indicateurs financiers face à ces changements. Les scénarios peuvent correspondre à de simples événements opérationnels, tels qu'une augmentation du prix des matières premières, une perturbation des activités ou des événements climatiques plus complexes, comme des vagues de chaleur, une hausse du niveau de la mer ou la taxe carbone.

Le modèle de financement de projet utilisé par la méthodologie SAVi se présente dans un format de fichier Excel et suit les meilleures pratiques SMART de Corality pour améliorer la lisibilité et l'auditabilité du modèle par un tiers. Les extraits du modèle de dynamique des systèmes dans la méthodologie SAVi sont utilisés comme intrants dans le modèle de financement de projet et vice versa. Le modèle de dynamique des systèmes quantifie et chiffre les effets externes environnementaux, sociaux et économiques pertinentes associés au projet. Il permet également d'identifier les scénarios utilisés qui figurent dans le tableau des scénarios. Suivant le but de l'évaluation et le public ciblé, certains des effets externes sont inclus comme coûts ou bénéfices dans le tableau des scénarios. Les extraits du modèle de dynamique des systèmes peuvent également modifier certaines des principales hypothèses du modèle de financement de projet.

Les principaux extraits du modèle de financement de projet sont les indicateurs financiers précédemment mentionnés. Lors de la personnalisation du modèle, il est possible de modifier ou d'agrandir la liste des indicateurs selon les besoins. Des données spécifiques au projet, telles que le coût du financement, peuvent également être extraites du modèle de financement de projet et réintroduites dans le modèle de dynamique des systèmes.



## 5.0 Conclusions

L'évaluation de l'ACB conventionnelle produit des résultats favorables à la production électrique au charbon et à l'énergie éolienne. La production d'électricité au fioul lourd obtient des résultats défavorables en raison des coûts élevés du combustible. L'analyse coûts/bénéfices révèle que la prise en compte des risques climatiques et des effets externes modifie la situation. Le LCOE pour une centrale alimentée au charbon est 23 % supérieur à celui du projet éolien terrestre, tandis que le LCOE d'une centrale alimentée au FOL le multiplie par 3,5. Les effets externes calculés, en particulier le coût social du charbon, ont un impact sur le LCOE des centrales au charbon et au FOL encore plus important que les risques climatiques. L'électricité générée par l'énergie éolienne devient alors relativement plus abordable.

En conséquence, le parc éolien devrait être l'option la plus bénéfique à la région de Taïba N'Diaye, car il minimise les impacts environnementaux tout en maximisant les avantages socio-économiques. L'énergie éolienne génère nettement plus d'emplois que les autres technologies et stimule les dépenses locales, tout en réduisant au minimum l'occupation des sols, la consommation d'eau, les émissions et les perturbations routières.

Comparer les indicateurs de compétitivité financière permet de démontrer que la rentabilité du parc éolien est équivalente à celle des centrales au charbon lorsqu'on tient compte des effets externes et des risques climatiques. Dans ce scénario, la VAN du projet éolien est même comparativement plus élevée. L'option du FOL affiche des résultats financiers très faibles par rapport aux deux autres technologies et n'est pas considérée comme financièrement viable. Cela résulte du coût élevé et de l'inefficacité de la combustion du FOL à produire de l'électricité.





## Références

- Bassi, A. M., K. McDougal et D. Uzsoki (2017a). *Sustainable Asset Valuation Tool: Roads (Outil d'évaluation des actifs durables : les routes)*. Disponible sur le site : <https://www.iisd.org/sites/default/files/publications/sustainable-asset-valuation-tool-roads.pdf>
- Bassi, A. M., K. McDougal et D. Uzsoki (2017b). *Sustainable Asset Valuation Tool: Energy infrastructure (Outil d'évaluation des actifs durables : les infrastructures énergétiques)*. Disponible sur le site : <https://www.iisd.org/sites/default/files/publications/sustainable-asset-valuation-tool-energy.pdf>
- Centre de ressources sur les entreprises et les droits de l'homme. (date inconnue). Sénégal : les impacts d'une centrale électrique à charbon sur les communautés de Bargny. Disponible sur le site : <https://www.business-humanrights.org/fr/s%C3%A9n%C3%A9gal-les-impacts-dune-centrale-%C3%A9lectrique-%C3%A0-charbon-sur-les-communaut%C3%A9s-de-bargny>
- Cabinet d'Éco-conseil et d'Études. (2015). *Parc éolien de Taïba Ndiaye : étude d'impact environnemental et social (rapport provisoire REVO4)*. HPR Ankh Consultants.
- The Center for Media and Democracy (Centre pour les médias et la démocratie). (6 février 2019). Source Watch: Sendou Power Station. (Source Watch : centrale de Sendou). Disponible sur le site [https://www.sourcewatch.org/index.php/Sendou\\_power\\_station#Ownership](https://www.sourcewatch.org/index.php/Sendou_power_station#Ownership)
- Forrester, J.W. (1961). *Industrial dynamics (Dynamique industrielle)*. MIT Press.
- Agence internationale de l'énergie. (2014). *Perspectives énergétiques mondiales pour 2014*. Disponible sur le site <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2014.pdf>
- Agence internationale de l'énergie. (2015). *Projected cost of generating electricity: 2015 edition (Coûts prévisionnels de la production d'électricité, édition 2015)*. Disponible sur le site <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2015/7057-proj-costs-electricity-2015.pdf>
- Nordhaus, W. (2017). Revisiting the social cost of carbon (Réévaluer le coût social du carbone). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* [Archives de l'Académie américaine des sciences], 11(7), 1518–1523. Disponible sur le site <https://www.pnas.org/content/114/7/1518>
- Review of Business and Technology. (2017). *AfDB authorises thorough investigations on Sendou Coal Fired power plant*. (La BAfD autorise un examen approfondi de la centrale électrique à charbon de Sendou). Disponible sur le site <http://africanreview.com/energy-a-power/power-generation/afdb-authorises-thorough-investigations-on-sendou-coal-fired-power-plant>
- Roberts, N., Andersen, D., Deal, R., Garet, M., & Shaffer, W. (1983). *Introduction to computer simulation. The system dynamics approach*. (Introduction à la simulation informatique : l'approche de la dynamique des systèmes). MA: Addison-Wesley.
- Saïd Ba, A. (2018). *The energy policy of the Republic of Senegal (hal-01956187f)* [La politique énergétique du Sénégal]. Disponible sur le site <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01956187/document>
- Programme des Nations Unies pour l'environnement. (2011). *Vers une économie verte : pour un développement durable et une éradication de la pauvreté*. Disponible sur le site [http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0069/Temis-0069030/19079\\_2011.pdf](http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0069/Temis-0069030/19079_2011.pdf)
- Ministère américain de l'énergie. (2015). *Regional climate vulnerabilities and resilience. (Vulnérabilités et résilience climatiques régionales)*. Washington, DC : Ministère américain de l'énergie.



## Annexe I. Coûts et revenus par actif (millions DE FRANCS CFA)

Catégorie	Éolien terrestre	FOL	Charbon
Coût de l'investissement et de l'E&M	41 897	21 498	18 283
Planification et phase de construction			
Coût du compactage du sol	9,6	14,6	10,2
Coût d'enlèvement de la végétation	9,6	14,6	10,2
Coûts liés à la détérioration des routes	1,4	2,2	1,5
Phase d'exploitation			
Endommagement des routes	0,9	1,4	1,0
Activités préparatoires	5,9	9,1	6,4
Coûts du combustible	0,0	690 314,5	63 763
Frais de financement	55 415,9	14 504,8	12 191
Fiscalité liée au projet	24 736,9	25 214,2	25 214,2
Impacts du changement climatique sur les coûts du combustible	0,0	0,0	-77,5
Taxe carbone	0,0	13 905,8	38 936
<b>Sous-total (1)</b>	<b>122 077</b>	<b>765 479</b>	<b>158 339</b>
Dépenses découlant des revenus	(1,857)	(586)	(439)
Effets externes			
Planification et phase de construction			
Valeur ajoutée agricole	179,8	288,6	202,0
Recettes fiscales issues de l'agriculture	36,0	57,7	40,4
Coûts de la pollution sonore	1,9	2,9	2,0
Phase d'exploitation			
Incidences sur le rendement	0,9	1,4	1,0
Incidences sur les oiseaux	4,1	0,0	0,0



Catégorie	Éolien terrestre	FOL	Charbon
Incidences sur la faune	2,3	3,6	2,5
Accidents	8,8	0,0	0,0
Coût de l'électrification	4,4	6,8	4,8
Dépenses discrétionnaires pour l'entretien des routes	(586)	(899)	(629)
Occupation des sols	180	289	202
Coût social du carbone	1 846,5	23 670,0	65 580,7
Valeur des effets externes	(179)	22 835	64 967
<b>Sous-total (1+2)</b>	<b>121 898</b>	<b>788 313</b>	<b>223 306</b>
<b>Recettes</b>	<b>323 803</b>	<b>323 803</b>	<b>323 803</b>
<b>Coûts et bénéfices</b>	<b>201 904</b>	<b>(464 511)</b>	<b>100 497</b>



©2019 The International Institute for Sustainable Development  
Published by the International Institute for Sustainable Development.

**Head Office**

111 Lombard Avenue, Suite 325  
Winnipeg, Manitoba  
Canada R3B 0T4

**Tel:** +1 (204) 958-7700  
**Website:** [www.iisd.org](http://www.iisd.org)  
**Twitter:** @IISD\_news



[iisd.org](http://iisd.org)