

Maintenance prédictive des stations de raccordement des éoliennes en mer

ROADEF 2025

Solène Delannoy-Pavy (RTE - CERMICS)

Manuel Ruiz, Cyrille Vessaire (RTE)

Vincent Leclère, Axel Parmentier (CERMICS)

27/02/25



Le réseau
de transport
d'électricité



Plan de la présentation

Contexte

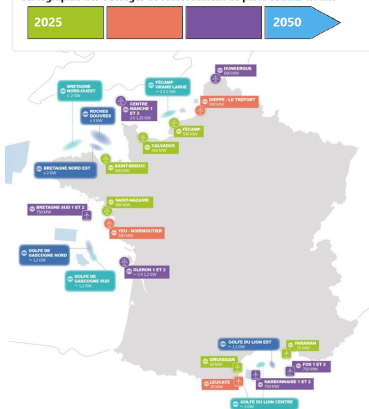
Problème d'optimisation de la maintenance lourde

Résolution par Sample Average Approximation

Prise en compte des incertitudes sur le comportement du poste

Essor de l'éolien en mer

Cartographie des ouvrages de raccordement de parcs éoliens en mer



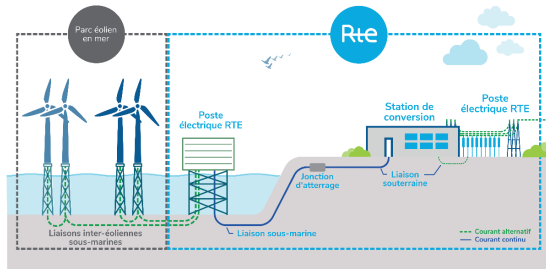
Source: RTE - 2024

La puissance publique veut encourager le raccordement.

➔ Conditions avantageuses pour les producteurs

Du point de vue de RTE:

- ▶ Pénalités proportionnelles à la puissance non évacuée
- ▶ Quota de journées de maintenance gratuites prévu dans les appels d'offre



Source: RTE

Essor de l'éolien en mer

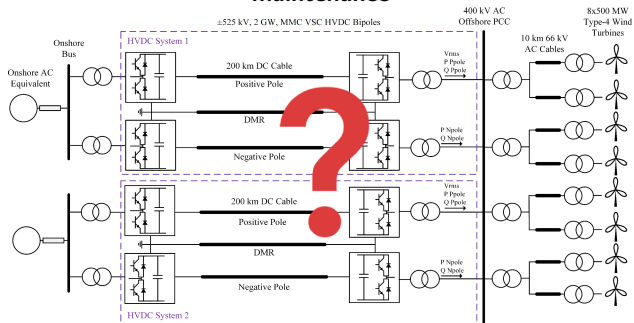
Cartographie des ouvrages de raccordement du parc éolien en mer



Choix stratégiques qui nécessitent d'estimer les coûts de maintenance



Choix stratégiques qui nécessitent d'estimer les coûts de maintenance



Source: Tennet

RTE a le choix entre plusieurs schémas de poste.

➡ Comparaison des coûts de maintenance associés aux schémas

Essor de l'éolien en mer



L'estimation des coûts est difficile



Source: RTE - PSEM Calvados

Choix stratégiques qui nécessitent
d'estimer les coûts de maintenance



L'estimation des coûts est difficile



- ▶ Postes à plus de 100km des côtes
- ▶ 2h de travail effectif /jour contre 7 sur terre

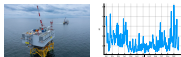
Essor de l'éolien en mer



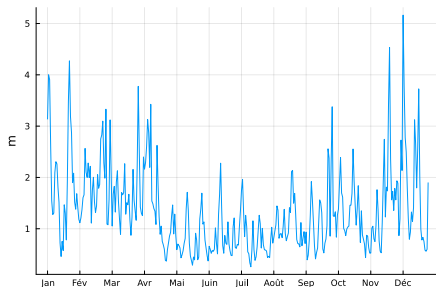
**Choix stratégiques qui nécessitent
d'estimer les coûts de maintenance**



L'estimation des coûts est difficile



L'estimation des coûts est difficile



Source: Copernicus

Moyenne journalière de la hauteur des vagues
(Baie de Saint-Brieuc - 2023)

Si les vagues sont trop hautes, on ne peut pas accéder au poste.

➡ La maintenance doit tenir compte des conditions d'accès qui sont stochastiques.

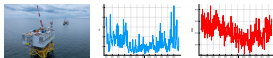
Essor de l'éolien en mer



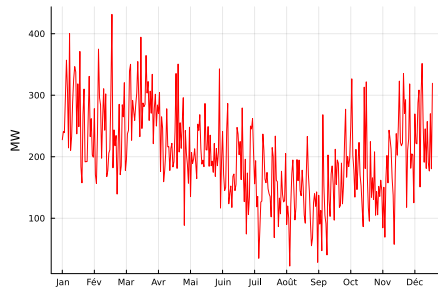
Choix stratégiques qui nécessitent d'estimer les coûts de maintenance



L'estimation des coûts est difficile



L'estimation des coûts est difficile



Source: RTE

Moyenne journalière de la production d'un parc éolien offshore
(Baie de Saint-Brieuc - 2023)

Les pénalités sont proportionnelles à la puissance non évacuée.

➡ Les pénalités dépendent du productible qui est stochastique.

Plan de la présentation

Contexte

Problème d'optimisation de la maintenance lourde

Résolution par Sample Average Approximation

Prise en compte des incertitudes sur le comportement du poste

Les décisions de maintenance sont prises avant de connaître l'aléa

Hypothèse 1: Maintenance lourde uniquement

La **maintenance lourde**:

- ▶ nécessite l'arrêt du poste;
- ▶ doit être anticipée;
- ▶ rend le poste à l'état neuf.

Les décisions de maintenance sont prises avant de connaître l'aléa

Hypothèse 1: Maintenance lourde uniquement

Hypothèse 2: Conditions d'accès parfaites

On peut toujours aller au poste.

Les décisions de maintenance sont prises avant de connaître l'aléa

Hypothèse 1: Maintenance lourde uniquement

Hypothèse 2: Conditions d'accès parfaites

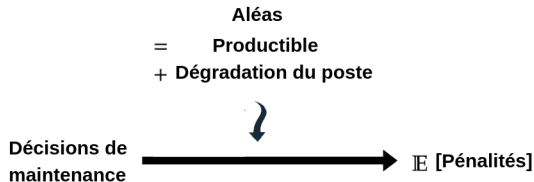
Objectif: Estimer l'espérance des pénalités pour un poste.

Les décisions de maintenance sont prises avant de connaître l'aléa

Hypothèse 1: Maintenance lourde uniquement

Hypothèse 2: Conditions d'accès parfaites

Objectif: Estimer l'espérance des pénalités pour un poste.



Cadre de la maintenance lourde

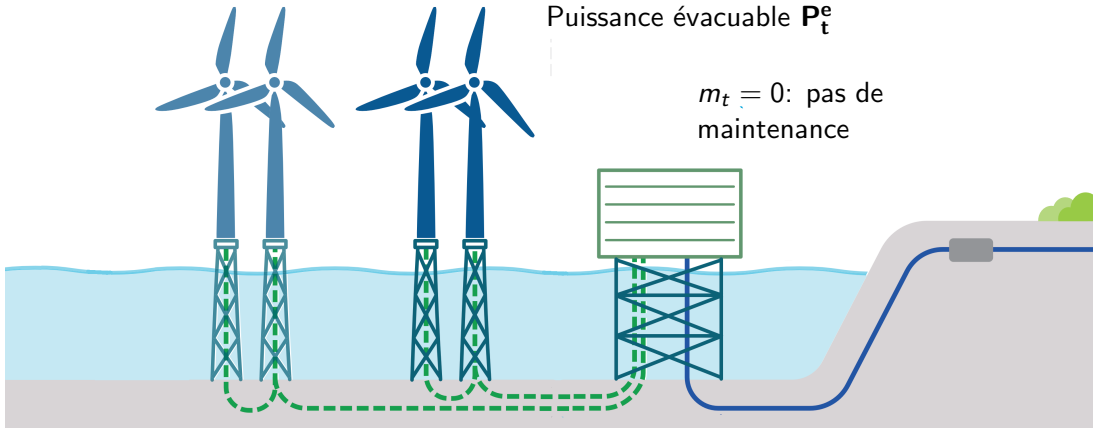
On se place à horizon fini T .

On prend comme pas de temps la durée d'une maintenance.

Productible $\mathbf{Prod}_t$

Puissance évacuable $\mathbf{P}_t^e$

$m_t = 0$: pas de
maintenance



Cadre de la maintenance lourde

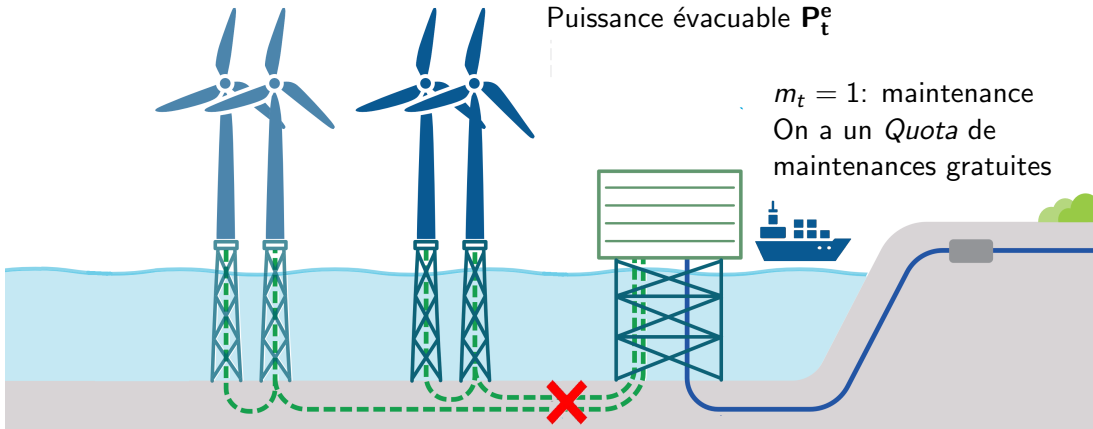
On se place à horizon fini T .

On prend comme pas de temps la durée d'une maintenance.

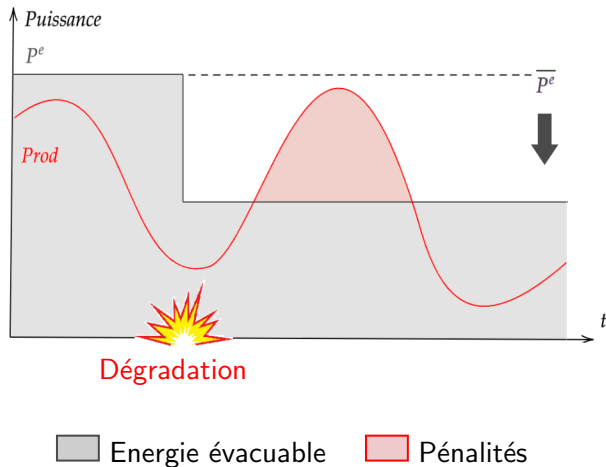
Productible $\mathbf{Prod_t}$

Puissance évacuable $\mathbf{P_t^e}$

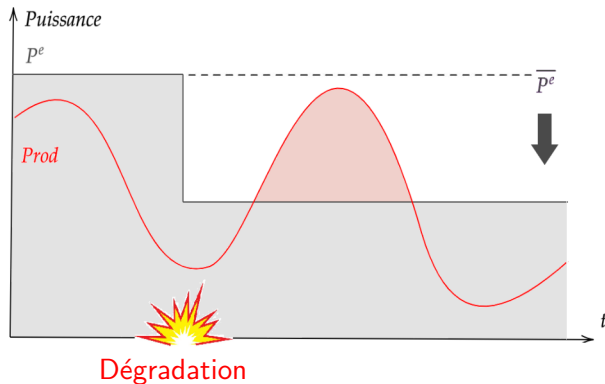
$m_t = 1$: maintenance
On a un *Quota* de
maintenances gratuites



Les pénalités dépendent du productible et de la puissance évacuable



Les pénalités dépendent du productible et de la puissance évacuable



Energie évacuable

 Pénalités

$$\text{Pénalités au pas de temps } t \propto \mathbb{1}_{m_t=0} (Prod_t - P_t^e)^+ + \mathbb{1}_{\left\{ m_t=1, \left(\sum_{\tau \leq t} m_\tau \right) > Quota \right\}} Prod_t$$

Problème d'optimisation de la maintenance lourde (POML)

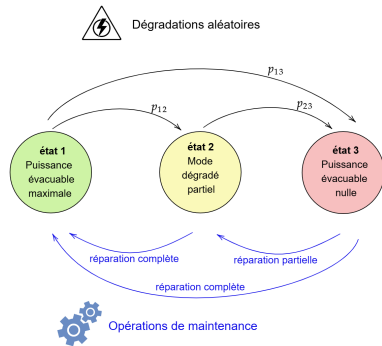
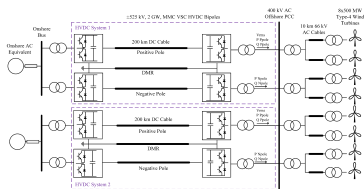
$$J(Quota) = \min_{m_{[T]} \in \{0,1\}^T} \mathbb{E} \left[\underbrace{\sum_{t=0}^T \mathbb{1}_{m_t=0} (\mathbf{Prod}_t - \mathbf{P}_t^e)^+ + \mathbb{1}_{\left\{m_t=1, \left(\sum_{\tau \leq t} m_\tau\right) > Quota\right\}} \mathbf{Prod}_t}_{\text{pénalités au pas de temps } t} \right]$$

Le productible $\mathbf{Prod}_t$ est exogène et dépend de la météorologie.

La puissance évacuable $\mathbf{P}_t^e$ dépend des dégradations et des opérations de maintenance.

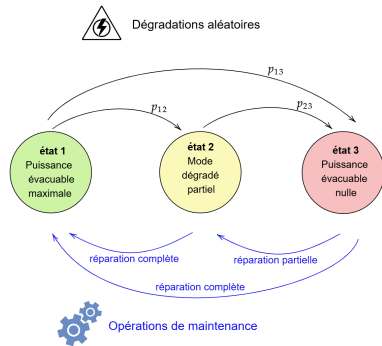
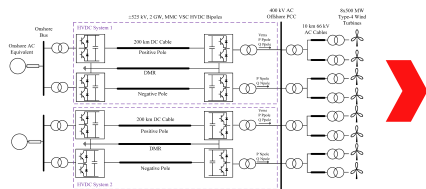
On représente $\mathbf{P}_t^e$ par un Processus de Décision Markovien (MDP)

Schéma de poste



On représente $\mathbf{P}_t^e$ par un Processus de Décision Markovien (MDP)

Schéma de poste



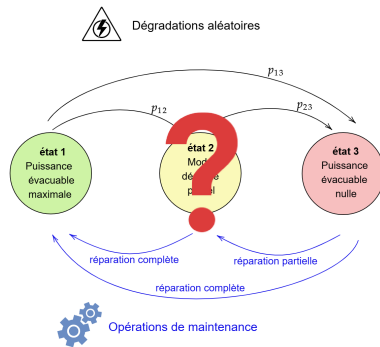
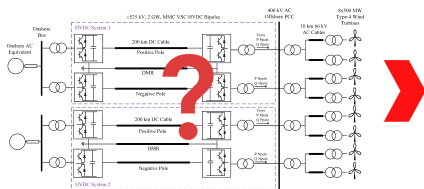
Ensemble d'états $\mathcal{P}$ = niveaux de puissance évacuée

Ensemble d'actions $\mathcal{M} = \{0, 1\}$

Probabilités de transition $P_{pp'}^m = \mathbb{P}(P_{t+1}^e = p' | P_t^e = p, m_t = m)$

On représente P_t^e par un Processus de Décision Markovien (MDP)

Schéma de poste



Les choix stratégiques tels que les choix de design du poste dictent le MDP.

Problème d'optimisation de la maintenance lourde (POML)

$$J(Quota) = \min_{m_{[T]}} \mathbb{E} \left[\underbrace{\sum_{t=0}^T \mathbb{1}_{m_t=0} (\text{Prod}_t - \mathbf{P}_t^e)^+ + \mathbb{1}_{\left\{m_t=1, \left(\sum_{\tau \leq t} m_\tau\right) > Quota\right\}} \text{Prod}_t}_{\text{pénalités au pas de temps } t} \right]$$

subject to: $\mathbb{P}(\mathbf{P}_{t+1}^e = p' | \mathbf{P}_t^e = p, m_t = m) = P_{pp'}^m \quad \forall t \in [T-1]; \quad \forall p, p' \in \mathcal{P}$

$P_0^e = \overline{P^e}$

$m_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in [T]$

Le problème d'optimisation de la maintenance lourde peut être résolu par
Sample Average Approximation (SAA)

Plan de la présentation

Contexte

Problème d'optimisation de la maintenance lourde

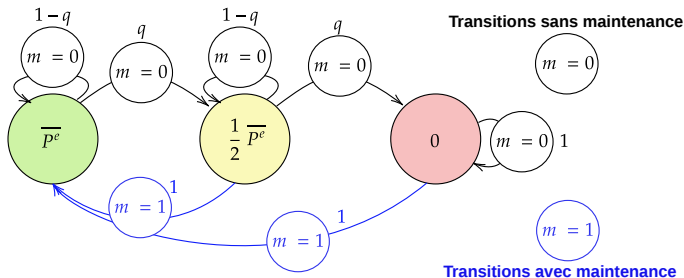
Résolution par Sample Average Approximation

Prise en compte des incertitudes sur le comportement du poste

Illustration sur un MDP simple

Les probabilités de dégradation q sont les mêmes pour chaque état.

➡ **Un seul paramètre: q .**



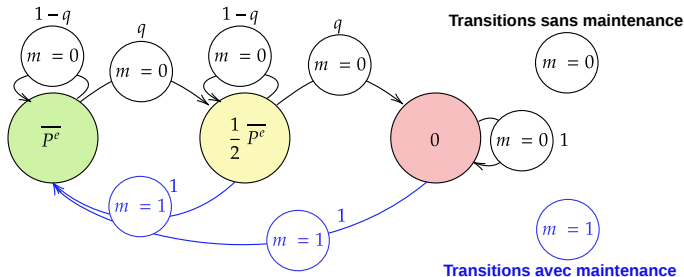
Espace d'états $\mathcal{P} = \{\overline{P^e}, \frac{1}{2}\overline{P^e}, 0\}$

Espace d'actions $\mathcal{M} = \{0, 1\}$

Illustration sur un MDP simple

Les probabilités de dégradation q sont les mêmes pour chaque état.

➡ **Un seul paramètre: q .**

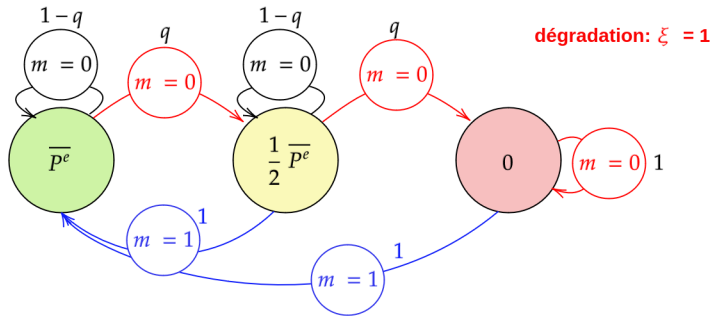


Probabilités de transition $P_{pp'}^m$

$$\mathbb{1}_{\{m=1\}} \mathbb{1}_{\{p'=\overline{p^e}\}} + \mathbb{1}_{\{m=0, p'=p\}} (1-q) + \mathbb{1}_{\{m=0, p'=p+1\}} q + \mathbb{1}_{\{m=0, p'=p=0\}} q$$

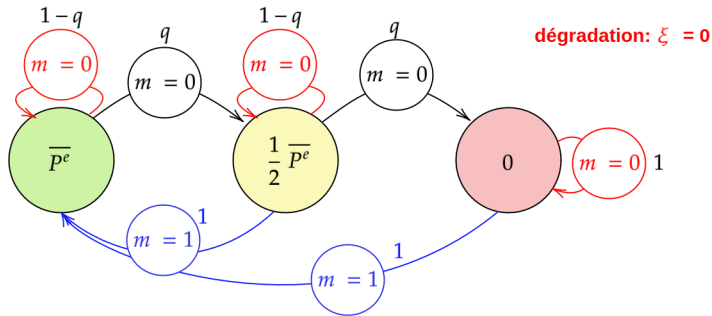
On peut générer à l'avance des dégradations indépendantes des opérations de maintenance

On génère des variables binaires ξ .



On peut générer à l'avance des dégradations indépendantes des opérations de maintenance

On génère des variables binaires ξ .



Le POML peut être résolu par Sample Average Approximation

On génère à l'avance N scénarios ω_i de Productibles $\times$ Dégradations.

➡ Productibles $Prod_t(\omega_i)$: on tire un scénario météorologique.

➡ Dégradations $\xi_t(\omega_i)$: on tire T dégradations avec une probabilité q .

$$J(Quota) = \min_{m_{[T]}} \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^T \mathbb{1}_{m_t=0} (\mathbf{Prod}_t - \mathbf{P}_t^e)^+ + \mathbb{1}_{\left\{m_t=1, \left(\sum_{\tau \leq t} m_\tau\right) > Quota\right\}} \mathbf{Prod}_t \right]$$

On approxime par N scénarios ω_i de Productibles $\times$ Dégradations

subject to: $\mathbb{P}(\mathbf{P}_{t+1}^e = p' | \mathbf{P}_t^e = p, m_t = m) = P_{pp'}^m \quad \forall t \in [T-1]; \quad \forall p, p' \in \mathcal{P}$

$$P_0^e = \overline{P^e}$$

$$m_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in [T]$$

Le POML peut être résolu par Sample Average Approximation

On génère à l'avance N scénarios ω_i de Productibles $\times$ Dégradations.

➡ Productibles $Prod_t(\omega_i)$: on tire un scénario météorologique.

➡ Dégradations $\xi_t(\omega_i)$: on tire T dégradations avec une probabilité q .

$$J(Quota) = \min_{m_{[T]}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T \mathbb{1}_{\{m_t=0\}} (Prod_t(\omega_i) - P_t^e(\omega_i))^+ + \mathbb{1}_{\{m_t=1, (\sum_{\tau \leq t} m_\tau) > Quota\}} Prod_t(\omega_i)$$

$$\text{subject to: } P_{t+1}^e(\omega_i) = \underbrace{f(P_t^e(\omega_i), m_t, \xi_{t+1}(\omega_i))}_{\text{dynamique du MDP}} \quad \forall t \in [T-1]$$

$$P_0^e(\omega_i) = \overline{P^e}$$

$$m_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in [T]$$

Le POML peut être résolu par Sample Average Approximation

On génère à l'avance N scénarios ω_i de Productibles $\times$ Dégradations.

➡ Productibles $Prod_t(\omega_i)$: on tire un scénario météorologique.

➡ Dégradations $\xi_t(\omega_i)$: on tire T dégradations avec une probabilité q .

$$J(Quota) = \min_{m_{[T]}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T \mathbb{1}_{\{m_t=0\}} (Prod_t(\omega_i) - P_t^e(\omega_i))^+ + \mathbb{1}_{\{m_t=1, (\sum_{\tau \leq t} m_\tau) > Quota\}} Prod_t(\omega_i)$$

$$\text{subject to: } P_{t+1}^e(\omega_i) = \underbrace{f(P_t^e(\omega_i), m_t, \xi_{t+1}(\omega_i))}_{\text{dynamique du MDP}} \quad \forall t \in [T-1]$$

$$P_0^e(\omega_i) = \overline{P^e}$$

$$m_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in [T]$$

$$f(P^e, m, \xi) = \mathbb{1}_{\{m=1\}} \overline{P^e} + \mathbb{1}_{\{m=0, \xi=0\}} \overline{P^e} + \mathbb{1}_{\{m=0, \xi=1\}} (P^e - \frac{1}{2} \overline{P^e})^+$$

Plan de la présentation

Contexte

Problème d'optimisation de la maintenance lourde

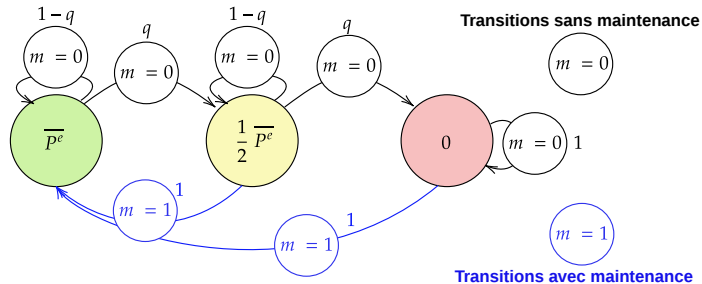
Résolution par Sample Average Approximation

Prise en compte des incertitudes sur le comportement du poste

On a plutôt une distribution sur un ensemble de MDP admissibles

Le MDP est estimé à partir de **données terrestres**, on a des incertitudes sur l'évolution des composants en mer.

MDP simple:



La probabilité de dégradation q suit la loi $\mathbb{Q}$.

Dans le problème précédent, les probabilités de transition sont **indexées par q** .

➡ On aurait pu écrire $\mathbb{P}_q, \mathbb{E}_q$.

$$J(Quota) = \min_{m_{[T]}} \mathbb{E} \left[\underbrace{\sum_{t=0}^T \mathbb{1}_{m_t=0} (\mathbf{Prod}_t - \mathbf{P}_t^e)^+ + \mathbb{1}_{\left\{ m_t=1, \left(\sum_{\tau \leq t} m_\tau \right) > Quota \right\}} \mathbf{Prod}_t}_{\text{pénalités au pas de temps } t} \right]$$

subject to: $\mathbb{P}(\mathbf{P}_{t+1}^e = p' | \mathbf{P}_t^e = p, m_t = m) = P_{pp'}^m$

$$m_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in [T]$$

Dans le problème précédent, les probabilités de transition sont **indexées par q** .

➡ On aurait pu écrire $\mathbb{P}_q, \mathbb{E}_q$.

$$J(Quota, q) = \min_{m_{[T]}} \mathbb{E}_q \left[\underbrace{\sum_{t=0}^T \mathbb{1}_{m_t=0} (\mathbf{Prod}_t - \mathbf{P}_t^e)^+ + \mathbb{1}_{\left\{ m_t=1, \left(\sum_{\tau \leq t} m_\tau \right) > Quota \right\}} \mathbf{Prod}_t}_{\text{pénalités au pas de temps } t} \right]$$

subject to: $\mathbb{P}_q(\mathbf{P}_{t+1}^e = p' | \mathbf{P}_t^e = p, m_t = m) = P_{pp'}^m(q) \quad \forall t \in [T-1]; \quad \forall p, p' \in \mathcal{P}$

$$P_0^e = \overline{P^e}$$

$$m_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in [T]$$

Dans le problème précédent, les probabilités de transition sont **indexées par q** .

➡ On aurait pu écrire $\mathbb{P}_q, \mathbb{E}_q$.

POML avec incertitude q :

$$J^{\text{incert}}(\text{Quota}) = \min_{m_{[T]}} \int \mathbb{E}_q \left[\underbrace{\sum_{t=0}^T \mathbb{1}_{m_t=0} (\text{Prod}_t - \mathbf{P}_t^e)^+ + \mathbb{1}_{\left\{m_t=1, \left(\sum_{\tau \leq t} m_\tau\right) > \text{Quota}\right\}} \text{Prod}_t}_{\text{pénalités au pas de temps } t} \right] d\mathbb{Q}(q)$$

subject to: $\mathbb{P}_q(\mathbf{P}_{t+1}^e = p' | \mathbf{P}_t^e = p, m_t = m) = P_{pp'}^m(q) \quad \forall t \in [T-1]; \quad \forall p, p' \in \mathcal{P}$

$P_0^e = \overline{P^e}$

$m_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in [T]$

Le POML avec incertitude sur le modèle peut être résolu par SAA

On génère à l'avance N scénarios ω_i .

➡ dégradation $\xi_t(\omega_i)$: **On tire la probabilité de dégradation selon $\mathbb{Q}$** , puis on tire T dégradations avec une probabilité q .

➡ productible $Prod_t(\omega_i)$: on tire un scénario météorologique.

$$J^{incert}(Quota) = \min_{m_{[T]}} \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T \mathbb{1}_{m_t=0} (Prod_t(\omega_i) - P_t^e(\omega_i))^+ + \mathbb{1}_{\{m_t=1, (\sum_{\tau \leq t} m_\tau) > Quota\}} Prod_t(\omega_i)}_{\text{pénalités au pas de temps } t}$$

subject to: $P_{t+1}^e(\omega_i) = \underbrace{f(P_t^e(\omega_i), m_t, \xi_{t+1}(\omega_i))}_{\text{dynamique du MDP}} \quad \forall t \in [T-1]$

$$P_0^e(\omega_i) = \overline{P^e}$$

$$m_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in [T]$$

Alternative : être robuste vis à vis du MDP (DRO)

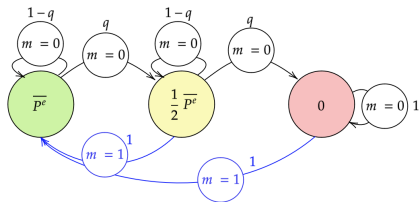
$$J^{DRO}(Quota) = \min_{m_{[T]}} \max_{q \in \mathcal{Q}} \mathbb{E}_q \left[\underbrace{\sum_{t=0}^T \mathbb{1}_{m_t=0} (\mathbf{Prod}_t - \mathbf{P}_t^e)^+ + \mathbb{1}_{(\sum_{[t]} m_t) > Quota} \mathbf{Prod}_t}_{\text{pénalités au pas de temps } t} \right]$$

subject to:

$$\mathbb{P}_q(\mathbf{P}_{t+1}^e = p' | \mathbf{P}_t^e = p, m_t = m) = P_{pp'}^m(q) \quad \forall t \in [T-1]; \quad \forall p, p' \in \mathcal{P}$$
$$P_0^e = \overline{P^e}$$
$$m_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in [T]$$

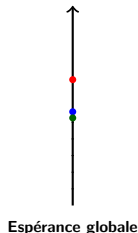
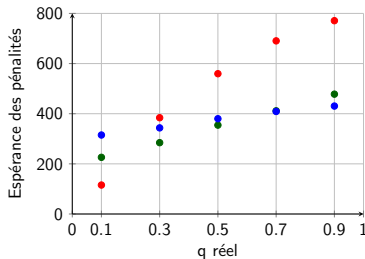
Une erreur d'estimation de q peut coûter cher

$q \in \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9\}$, les valeurs sont équiprobables.



Schémas de maintenance obtenus en résolvant

- POML avec incertitude sur q
- POML avec $q = 0.1$
- DRO



Espérance des pénalités des schémas de maintenance en fonction de q réel

Suite du travail:

- ▶ Construire des distributions de MDP à partir de données terrestres.
- ▶ Ajouter un recours pour prendre en compte les conditions d'accès dans la maintenance.

Merci de votre attention!