

Énergies renouvelables et Bâtiments à énergie positive

Bilan environnemental et bilan économique

Stéphane THIERS, ingénieur de recherche, CEP, MINES ParisTech

(stephane.thiers@mines-paristech.fr)

Le bâtiment à énergie positive

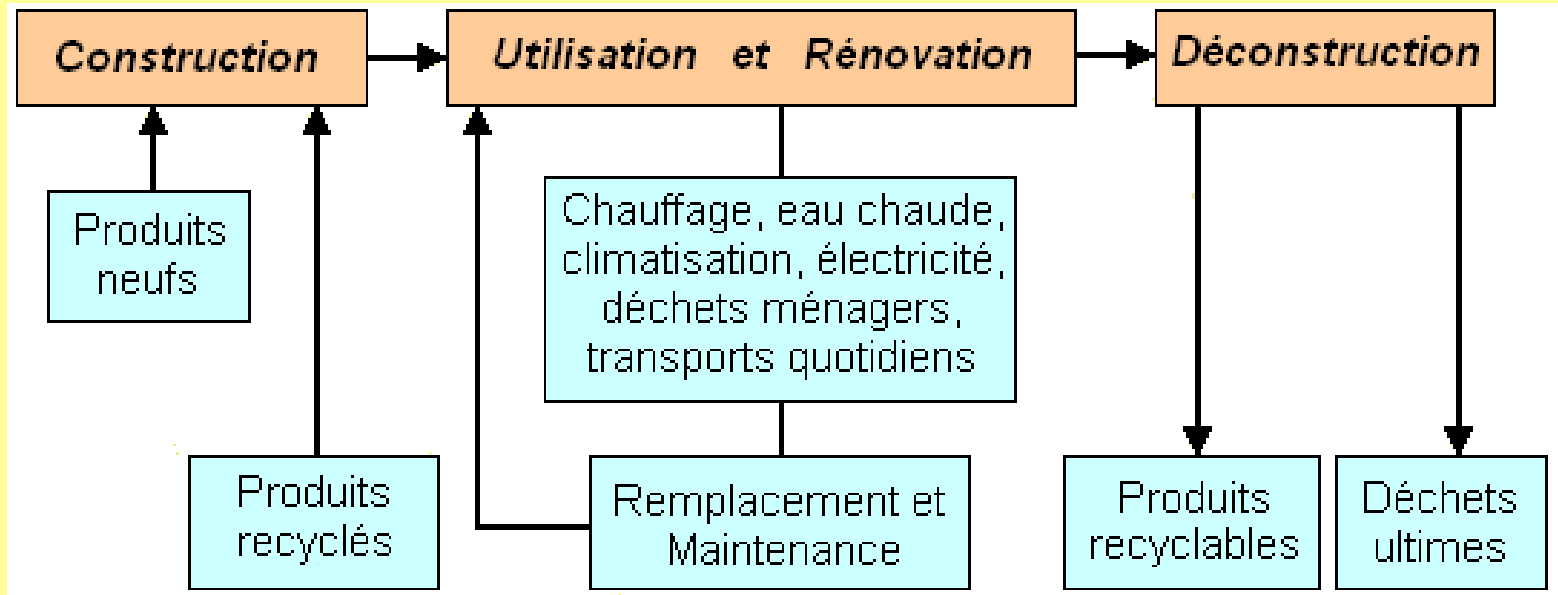
- Faibles besoins (isolation etc.)
- Équipements de conversion d'énergie performants
- Valorisation et transformation locale d'énergie renouvelable
 - Solaire → électricité / chaleur
 - Eolien → électricité
 - Biomasse → électricité / chaleur
 - Environnement → chaleur / fraîcheur (géothermie, aérothermie, ventilation etc.)

**Bilan moyen en énergie primaire positif sur une période d'une année
durant sa phase d'exploitation**

- Objectifs sur les *performances* du bâtiment **durant sa phase d'exploitation**
 - Réduction de l'impact du bâtiment sur l'environnement
 - Réduction de la facture énergétique du bâtiment
 - Éventuellement, réduction de la dépendance énergétique du bâtiment
 - si moyens de stockage suffisants et
 - si auto-consommation possible

Cycle de vie du bâtiment

- La vie du bâtiment ne se limite pas à sa phase d'exploitation !



Exemple de décomposition du cycle de vie du bâtiment pour une analyse environnementale

- Au cours de la vie du bâtiment, les phases de **construction**, de **rénovation** et de **déconstruction** ont une incidence sur
 - L'environnement
 - Le porte-feuille du propriétaire

Méthodes d'analyse des performances

► Performance environnementale

- Empreinte écologique : surface nécessaire pour faire vivre et absorber les déchets d'une population
- Bilan carbone : évaluation des émissions induites par le fonctionnement d'une industrie ou d'une administration
- *Analyse du cycle de vie : calcul d'indicateurs d'impacts*

► Performance économique

- *Coût Global Actualisé (CGA) : évaluation des coûts*
- *Valeur Actualisée Nette (VAN) : évaluation de la « rentabilité » du projet*
- *Taux d'Enrichissement en Capital (TEC)*

► Attention !

- Toutes ces méthodes reposent sur de nombreuses hypothèses, parfois arbitraires ou subjectives.
 - Les résultats qui en dépendent ne peuvent être présentés sans les hypothèses.
 - Les résultats absolus sont parfois moins pertinents que les résultats relatifs (comparaison entre variantes, scénarios etc.)

Méthodes d'analyse des performances

► Paramètres importants

- Limites du système étudié
 - Un système (panneau solaire, éolienne, pompe à chaleur...)
 - Bâtiment complet
 - Quartier

- Phases de la vie considérée (Construction, Utilisation, Rénovation, Déconstruction)

- Durée de vie du système étudié
- Durée de l'étude (qui peut être différente)

Analyse de cycle de vie

- Méthode normalisée (ISO 14 040 → 14 043)
- Analyse en 4 étapes

1. Définition des objectifs

- Détermination du produit/projet étudié, de sa fonction : le bâtiment, avec une durée de vie donnée, un certain type (tertiaire, logement,...), et un certain niveau de confort et de salubrité ⇒ **Unité de service, de fonction**
- Limitation des étapes du cycle de vie considérées : fabrications des matériaux et composants, construction, utilisation, rénovation, démolition et traitement des déchets
- Niveau d'approfondissement considéré (frontières du système étudié) : le bâtiment, + fourniture d'énergie et d'eau, traitement de l'eau, transport des matériaux et des personnes

2. Inventaire des flux de matières et d'énergie

- Relevé de tous les flux entrants et sortants : conso d'énergie, matériaux,
- Rejets dans l'air, l'eau, le sol
- Déchets solides

3. Analyse des impacts environnementaux

- Agrégation des différents flux pour en déduire les indicateurs d'impacts
 - Potentiel de réchauffement global, épuisement des ressources, acidification, eutrophisation, etc.


4. Interprétation des résultats et recherche d'améliorations

Analyse de cycle de vie

- Indicateurs d'impacts calculés selon différentes méthodes
 - GIEC, CML, Ecoindicator, EDIP, TRACI, Ecoinvent
- Exemple d'indicateurs pour la production d'un kilogramme d'acier

<i>Indicateur d'impact</i>	<i>Impact environnemental</i>	<i>Unité</i>	<i>1 kg d'acier</i>
Potentiel de réchauffement global (à 100 ans)	Effet de serre	kg CO ₂	1,10E+00
Énergie primaire utilisée		kWh	6,89E+00
Acidification	Pluies acides	kg SO ₂	6,38E-03
Production d'ozone photochimique	Smog	kg C ₂ H ₄	3,11E-04
Eutrophisation	Dégradation des rivières, des lacs	kg PO ₄	6,87E-04
Eau utilisée		m ³	2,41E-02
Production de déchets radioactifs		dm ³	3,70E-05
Production d'autres déchets		kg	3,71E-01

- Exemple de bases de données d'inventaire
 - Ecoinvent (Suisse), Umberto (Allemagne), SimaPro (Pays-Bas), INIES (France)


*Valeurs issues
d'une base de données*

Analyse de cycle de vie

- En pratique, l'ACV délicate à réaliser
 - Nécessite de nombreuses données
 - Nécessite de nombreuses hypothèses

- Il existe des logiciels pour appliquer ce type de calcul aux bâtiments
 - Team
 - Athena
 - BEES
 - Equer
 - etc.

Analyse de cycle de vie : Exemple EQUER

- Logiciel développé à MINES ParisTech
- Extrait de la base de données d'impacts (ici pour 1 kg de béton)

The screenshot shows the EQUER software interface. A dialog box titled 'Saisie caractéristiques' is open, displaying the following data for 'Béton B25':

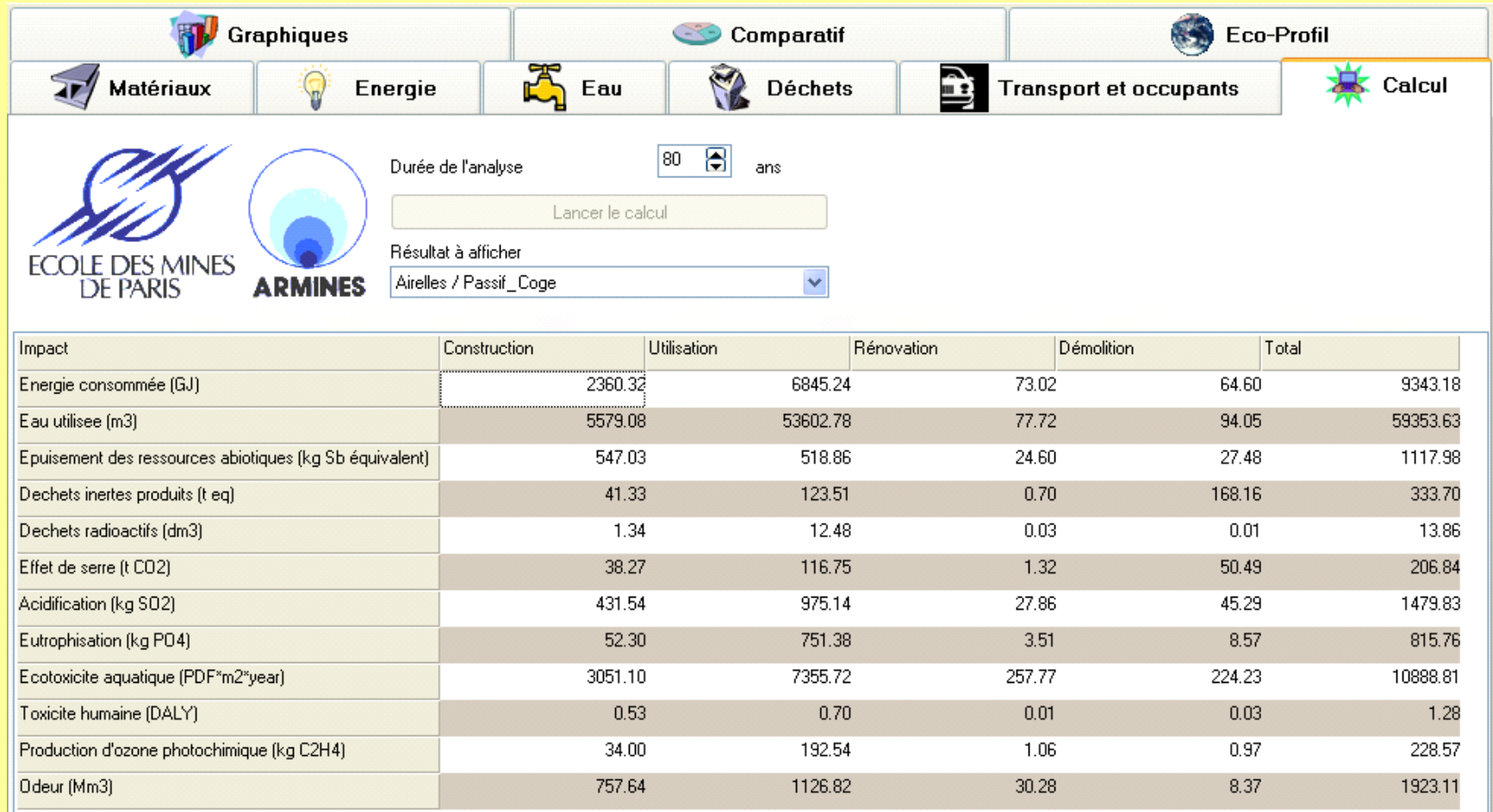
Caractéristiques	
Nom	Béton B25
Catégorie	Mat
Etape	FAB
Procédé	N
Unité	kg

Pollution	
Effet de serre (kg CO2)	0.133000
Acidification (kg SO2)	0.000364
Energie consommée (MJ)	1.000000
Eau utilisée (litres)	0.688000
Dechets inertes produits (kg eq)	0.007630
Epuisement des ressources abiotiques (E-15)	0.240600
Eutrophisation (kg PO4)	0.000046
Production d'ozone photochimique (kg C2H4)	0.000034
Ecotoxicité aquatique (m3)	0.000003
Dechets radioactifs (dm3)	0.000008
Toxicité humaine (kg)	0.000964
Odeur (m3)	0.000000

The background interface shows a list of materials with columns for 'Nom' and 'Catégorie'. The 'Béton B25' entry is selected. Other materials listed include PVC double vitrage, Isolant transparent 10 cm, Isolant transparent 5 cm, Acier de construction, Polystyrène, Bois - planche, Polyéthylène faible densité, transport M 28t, transport M train, and PVC dur.

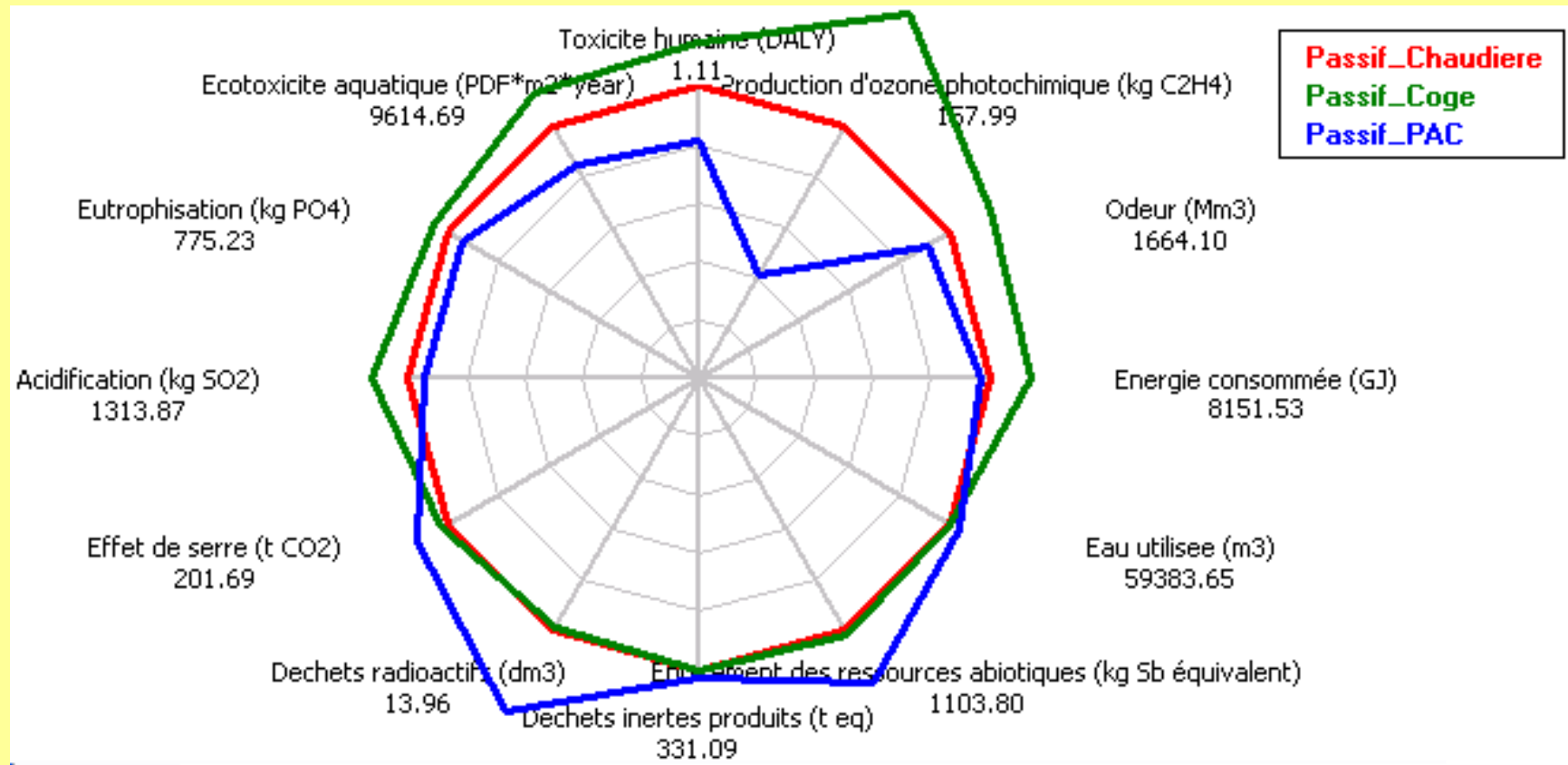
Analyse de cycle de vie : Exemple EQUER

- Résultats par indicateur et par étape de la vie du bâtiment



Analyse de cycle de vie : Exemple EQUER

- Comparatif résultats entre plusieurs variantes



Temps de retour CO₂

- Temps au bout duquel les émissions de la fabrication sont compensées par les émissions évitées durant la phase de fonctionnement
- Exemple : Quel est le bénéfice sur l'effet de serre apporté par l'installation de panneaux solaires ?
- Hypothèses
 - Référence : Maison individuelle avec chauffe-eau au gaz
 - Solution : 6 m² de panneaux solaire thermique (Chauffe-Eau Solaire Individuel)

	Energie produite (kWh/an)	Pompe (kWh/an)	Appoint (kWh/an)
CESI (6m ²)	2 640	67	3260

- **Données**
 - Émission de CO₂ fabrication panneaux solaires : 1514 kg
 - Émission de CO₂ chaudière gaz : 0,28 kg/kWh
 - Émission de CO₂ électricité : 0,0758 kg/kWh
- « Investissement initial » = 1514 kg
- Gain annuel = 2640 x 0,28 – 67 x 0,0758 = 733 kg
- **Temps de retour CO₂ : 1514/733 = 2,06 ans**
- **Émissions évitées** sur durée de vie de 20 ans : 20 x 733 – 1514 = **13 146 kg**

Les méthodes d'analyse économique

► Pour répondre à

- Combien ça va coûter ? Combien ça va rapporter ?
- Quelle solution sera la plus rentable ?

- Comptabilisation des flux économiques (entrants sortants)
- Unité : monnaie (€, \$, £ etc.)
- Limite de la comptabilité (additions et soustractions) : pas de prise en compte du temps !
 - La durée de vie du projet peut être longue (bâtiment : 50, 80 ans ou plus)

Comment tenir compte de l'effet du temps ?

- **Trois paramètres régissant les évolutions temporelles**
 - Loyer de l'argent : **taux d'intérêt**
 - Variation de la valeur de l'unité monétaire : **taux d'inflation**
 - Degré de préférence entre présent et avenir : **taux d'actualisation**

Évolutions temporelles

▶ Taux d'intérêt (i) (*interest rate*)

- À prendre en compte si financement par l'emprunt. Fixé par les banques.

▶ Taux d'inflation (λ) (*inflation rate*)

- Évalué par l'INSEE chaque année (IPC : Indice des prix à la consommation)
- Supposé constant pour simplifier (avenir non prévisible)
- **On le déduit pour toujours raisonner en monnaie constante.**

▶ Taux d'actualisation (a) (*discount rate*)

- Notion **fondamentale**
- Évalue une appréciation subjective : la confiance en l'avenir (ou risque)
 - Forte confiance : taux proche de zéro
 - Faible confiance : taux élevé

$$V_{n+1} = V_n \cdot (1 + a)$$

- V_n : Valeur subjective équivalente pour l'année n
- a est considéré comme constant durant tout le projet.

Coût Global Actualisé (CGA) (*Life Cycle Cost*)

- Employée pour évaluer le « coût » d'une « production » énergétique
- Permet de comparer les coûts de diverses filières de production, notamment le coût de production du kWh électrique
- **CGA = Somme actualisée des coûts sur la durée de vie de l'équipement**

$$CGA = \sum_{i=0}^N \frac{C_i}{(1+a)^i}$$

- C_i : coût pour l'année i (en monnaie constante), intègre frais, taxes, etc.
- a : taux d'actualisation
- N : durée de vie de l'équipement

- Formule utile quand $C_i = cte$ sur n années : $\sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+a)^i} = \frac{(1+a)^n - 1}{a \cdot (1+a)^n} = 1/Ka$
où Ka est le « coefficient d'actualisation »

- Si $C_i = cte$ sur les N années, alors $CGA = I + \frac{C_i}{Ka}$

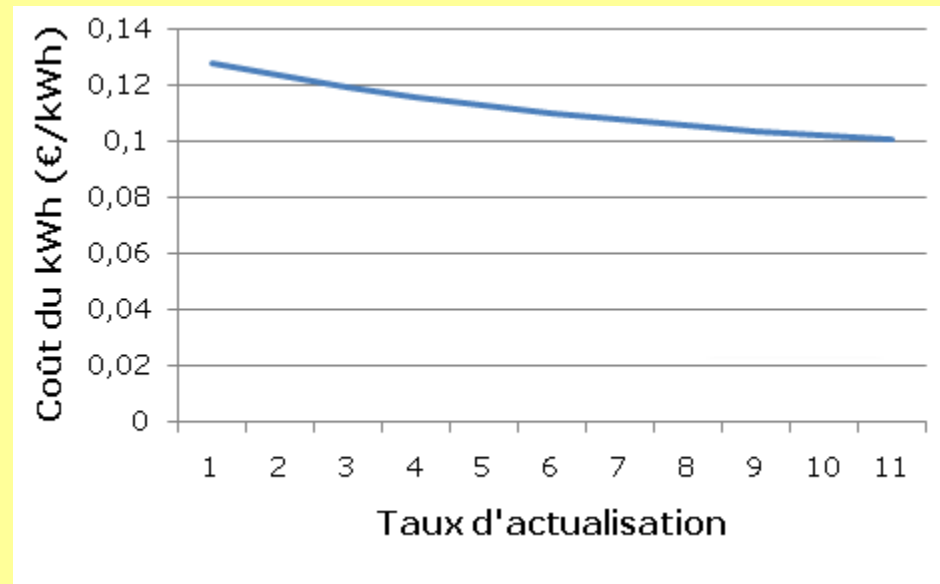
Calcul du Coût Global Actualisé (CGA)

► Exemple : Production d'électricité éolienne

- Durée de vie d'une machine : 20 ans
- Une machine de 3 kWe (éolienne domestique)
- Année 0 : Investissement initial (4000 € / kW) $C_0^I = I$
- Année i : coûts d'exploitation annuels (combustible) $C_i^E = 0$
- Année i : coûts de maintenance annuels $C_i^M = 0,03 \cdot C_0^I$
- Année N : Valeur résiduelle à déduire $C_N^F = 0$

$$CGA = I + \sum_{i=1}^N \frac{C_i^E + C_i^M}{(1+a)^i} - C_N^F$$

- Calcul du coût par kWh produit
- Calcul du coût par kW installé
- Ici, coût de production entre 0,1 et 0,13 €/kWh



Production annuelle supposée : 7500 kWh/an

Valeur Actuelle Nette (VAN) (*Net Present Value*)

▶ aussi appelée « Valeur Actualisée Nette »

- Employé pour évaluer la « valeur future » d'un projet énergétique (ou non)
- Permet de comparer la valeur future de différents scénarios

- **VAN = Somme actualisée des revenus moins les coûts sur la durée d'observation**

$$VAN_N = \sum_{i=0}^N \frac{R_i - C_i}{(1+a)^i}$$

- R_i : revenu/recettes pour l'année i (en monnaie constante)
- C_i : charges/dépenses pour l'année i (en monnaie constante)
- a : taux d'actualisation
- N : durée d'observation (en année)
- $R_i - C_i$ est appelé **flux annuel net de trésorerie (Cash-Flow)**

- **Le projet n'est « rentable » que si la VAN > 0.**

Valeur Actuelle Nette (VAN)

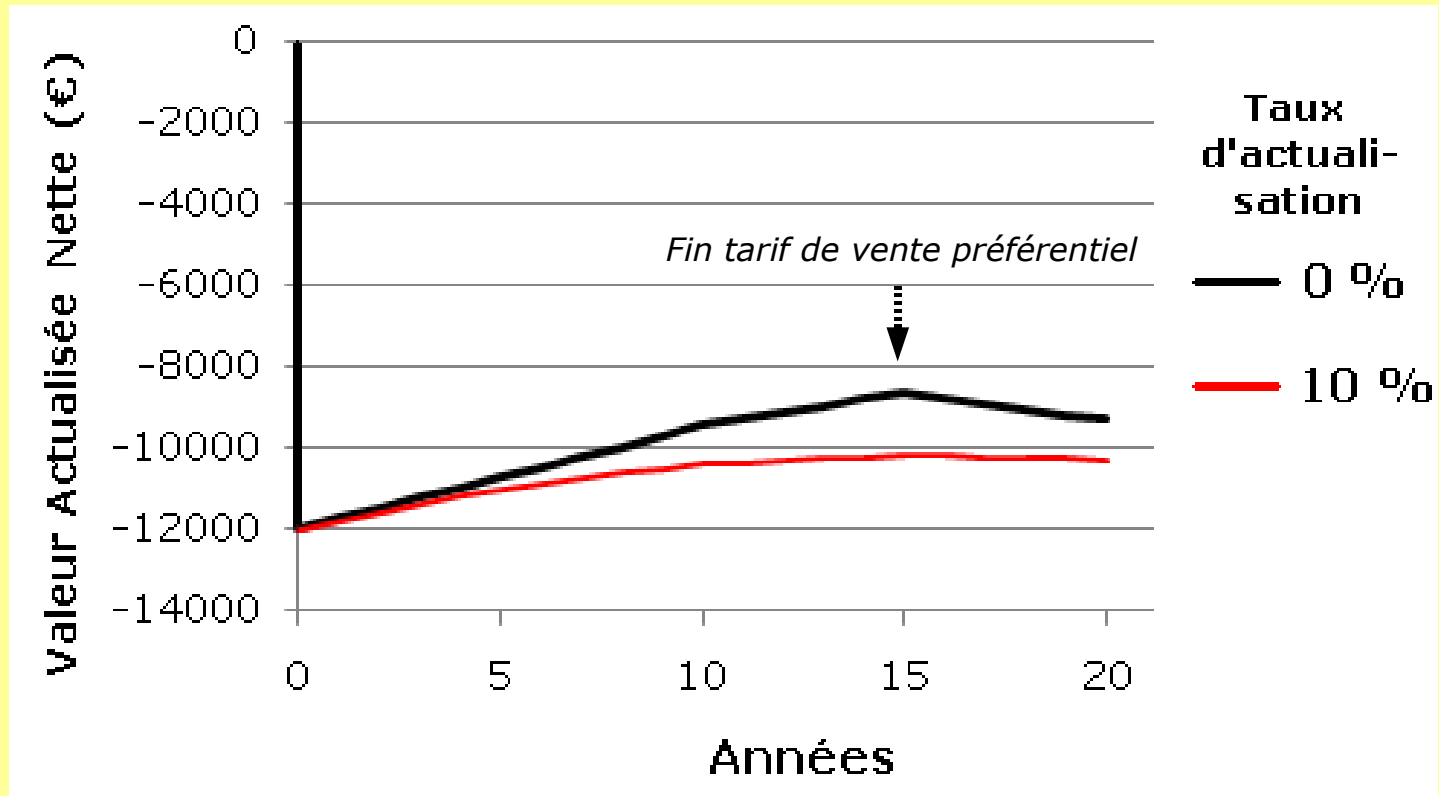
► Exemple : Production d'électricité éolienne

- Mêmes hypothèses que précédemment

$$VAN_N = -I + \sum_{i=1}^N \frac{R_i - C_i}{(1+a)^i} + C_N^F \qquad VAN_N = \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{(1+a)^i} - CGA$$

- Année i : revenu annuel (vente d'électricité) $R_i = T_v \cdot P \cdot Nh$
 - T_v : tarif de vente de l'électricité (en monnaie constante)
 - P : puissance nominale de l'éolienne
 - Nh : Nombre d'heures de fonctionnement équivalent à puissance nominale (ici, on suppose que : $Nh = 2500$ h/an)
- Le prix de vente et la productivité de l'éolienne peuvent varier selon les années.
- En France, obligation d'achat avec tarif fixé
 - les 10 premières années : 8,2 c€/kWh
 - les 5 ans qui suivent, inférieur ou égal (+ correction inflation)
 - au delà, pas de tarif préférentiel

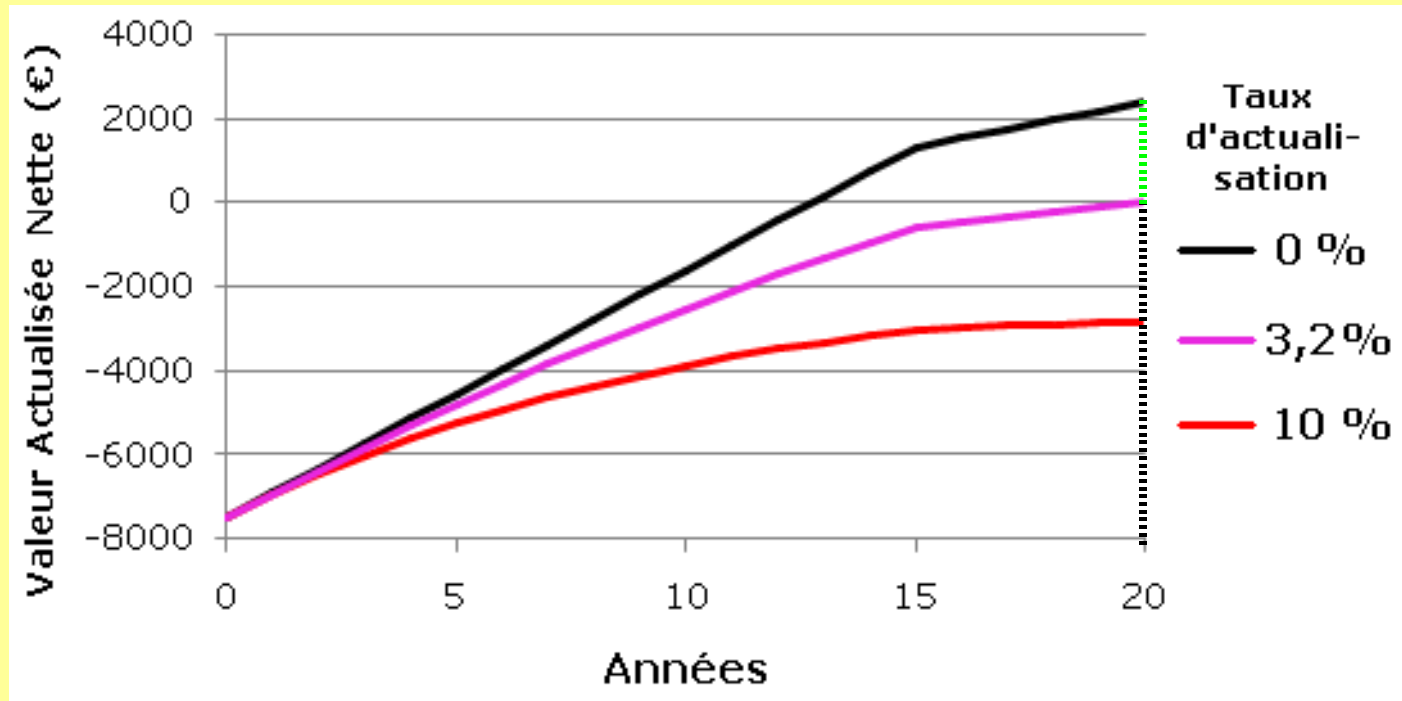
Valeur Actuelle Nette (VAN)



- Sur cet exemple, $VAN_{20 \text{ ans}}$ négative, quel que soit le taux d'actualisation
 - Investissement trop lourd, impossible à rentabiliser
 - Tarif de vente trop faible (< CGA)
 - Coûts de maintenance élevés (?)
 - Productivité trop faible

Valeur Actuelle Nette (VAN)

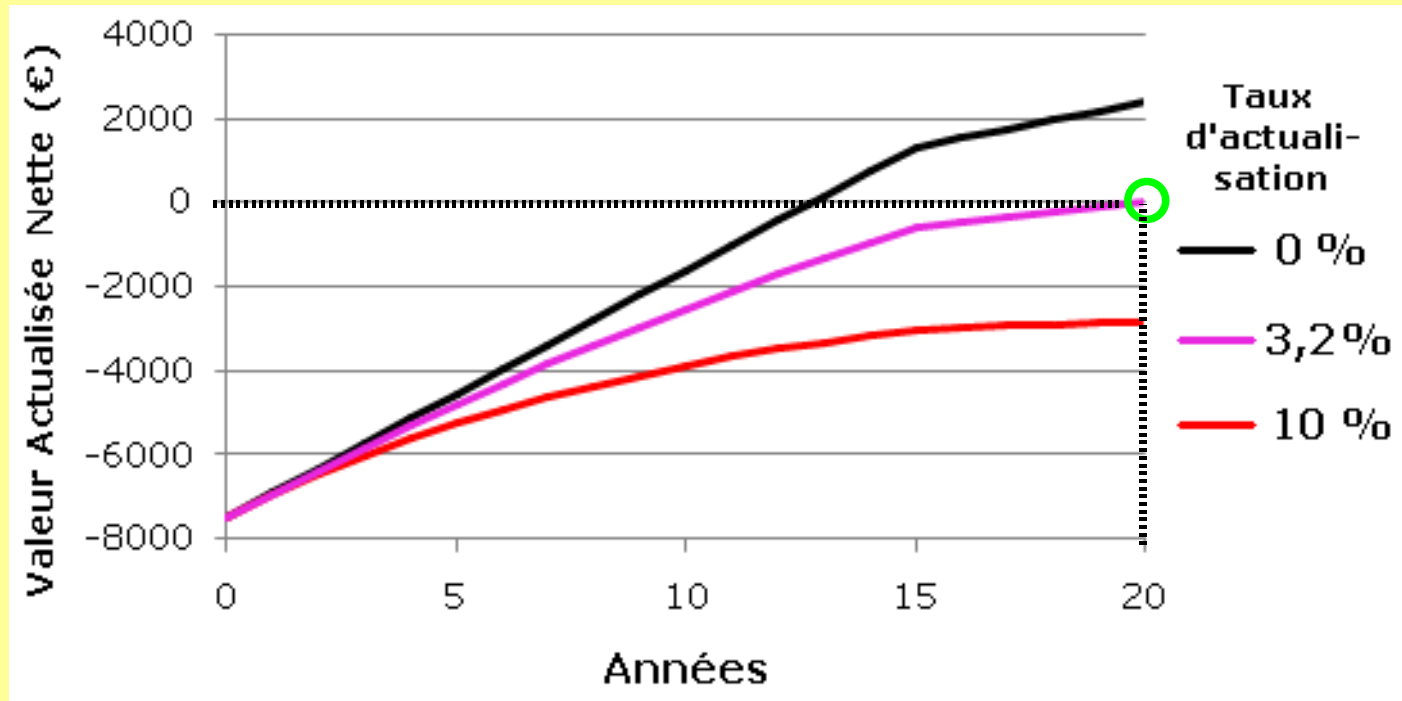
▶ Autre exemple plus favorable (fictif)



- Sur cet exemple, $VAN_{20 \text{ ans}}$ est positive pour les taux compris entre 0 et 3,2 %

Valeur Actuelle Nette (VAN)

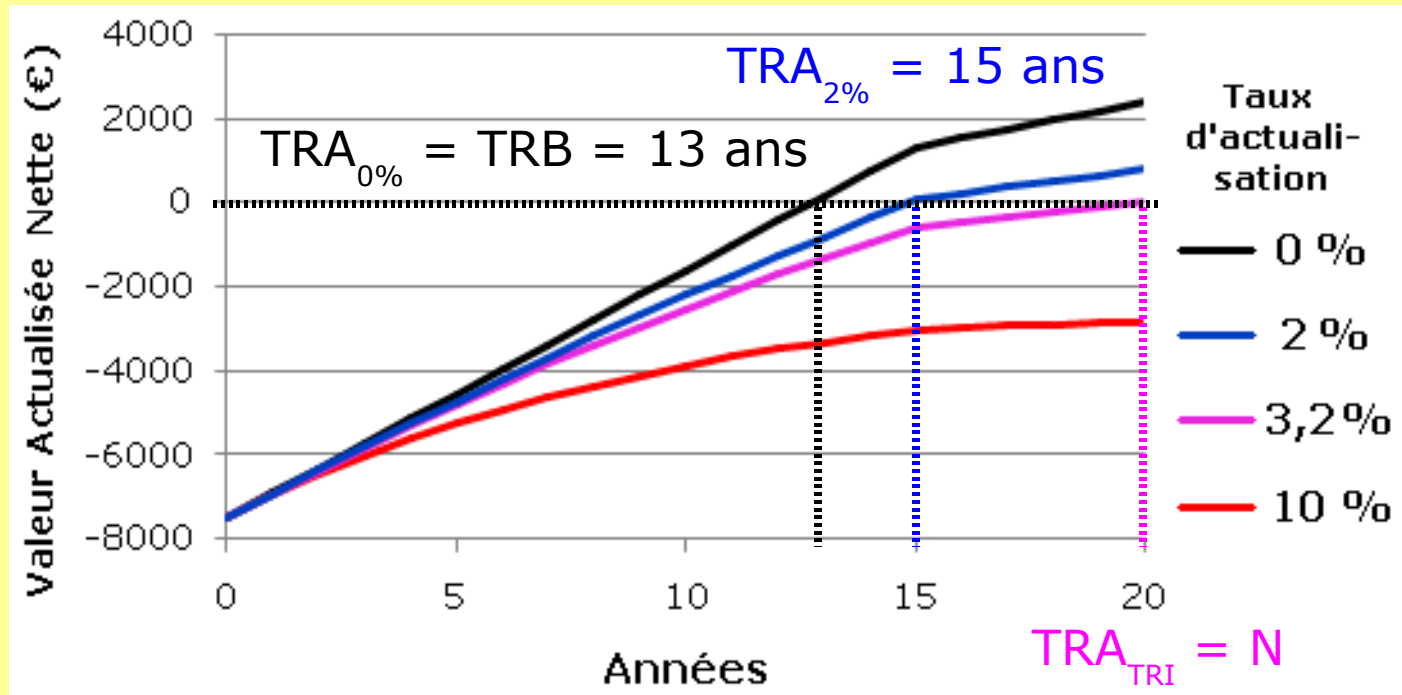
► Autre exemple plus favorable (fictif)



- Le **Taux de Rentabilité Interne (TRI)** est le taux qui annule la VAN_N
- ici TRI = 3,2 %
- À comparer au taux d'actualisation retenu pour le projet
- Projet « rentable » si $TRI > a$

Valeur Actuelle Nette (VAN)

► Autre exemple plus favorable (fictif)



- **Temps de Retour Actualisé (TRA)** : Pour un taux d'actualisation donné, le temps au bout duquel la VAN s'annule
- Ici, TRA = 13 ans si pas d'actualisation = Temps de Retour Brut (TRB)
- Supérieur si $a < 3,2 \%$, non défini si $a > 3,2 \%$
- Projet « rentable » si $TRA < N$

Taux d'Enrichissement en Capital (TEC)

- **Méthode TEC**, développée par Bernard Chabot (ADEME) p. analyse de projets énergétiques
- **Taux d'Enrichissement en Capital = VAN_N / I**
 - Sorte de VAN « normalisée »
 - Pour 1 € investi initialement, on retire TEC € à la fin de la période d'étude (N années)
- Théoriquement, le projet est rentable dès que la VAN > 0, donc dès que TEC > 0
- En pratique, pour tenir compte des impôts et autres frais non considérés, il est préférable de considérer le projet rentable lorsque **TEC > 0,3**
- *Application :*
On peut classer différents projets en fonction de leur TEC

Outils de calcul économique

- **RETScreen** (<http://www.etscreen.net>)
Outil canadien pour tout type de projet EnR
Diffusé gratuitement (téléchargeable)
- **CalSol** (<http://ines.solaire.free.fr>)
Outil grand public de l'INES (Institut National de l'Energie Solaire)
Solaire thermique uniquement
Diffusé gratuitement (en ligne)

Application à un bâtiment performant

▶ Définition du bâtiment / du projet étudié

- Bâtiment neuf, agrandissement, rénovation

▶ Choix d'une référence ou de scénarios

- Différentes solutions de financement (location, achat, etc.)
- Différents niveaux de performance

▶ Bilan des flux économiques

- Investissement : études, matériaux, équipements, transport, mise en œuvre, finitions, labélisation éventuellement, etc.
- Coûts : achat d'énergie, consommables, maintenance, renouvellement périodique, etc.
 - Nécessite la prévision des consommations énergétiques, des durées de vie des systèmes, de l'évolution des prix
- Revenu : vente d'énergie
 - Nécessite la prévision de la production
- Valeur résiduelle : prix de revente

▶ Indicateur le plus pertinent : la VAN

Sources bibliographiques

- *Contribution à l'analyse du cycle de vie des quartiers*, Thèse de doctorat, E. Popovici, école des Mines de Paris, 2006
- *Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive*, Thèse de doctorat, S. Thiers, MINES ParisTech, 2008.
Disponible en ligne : <<http://pastel.paristech.org/4692/>>
- *Cycle de vie des systèmes énergétiques*, D. Marchio et al., MINES ParisTech, 2009, à paraître
- *Analyse économique de projets en énergie renouvelable et utilisation rationnelle de l'énergie*, B. Chabot, cours du mastère OSE, MINES ParisTech, 2003-2004.