

Alerte nucléaire

Simulation de centrale nucléaire

Introduction

Le but de ce projet est de simuler de manière assez fidèle le fonctionnement d'un centre de production nucléaire (malgré quelques entorses avec la réalité).

Il s'inspire très fortement d'un ancien programme en basic (!) proposé par Lionel Paquin dans une revue des années 80 et tenait sur des machines huit bits ne proposant que 128ko de RAM.

Après qu'on lui ait demandé son nom, le joueur aura le choix entre trois niveaux de jeu :

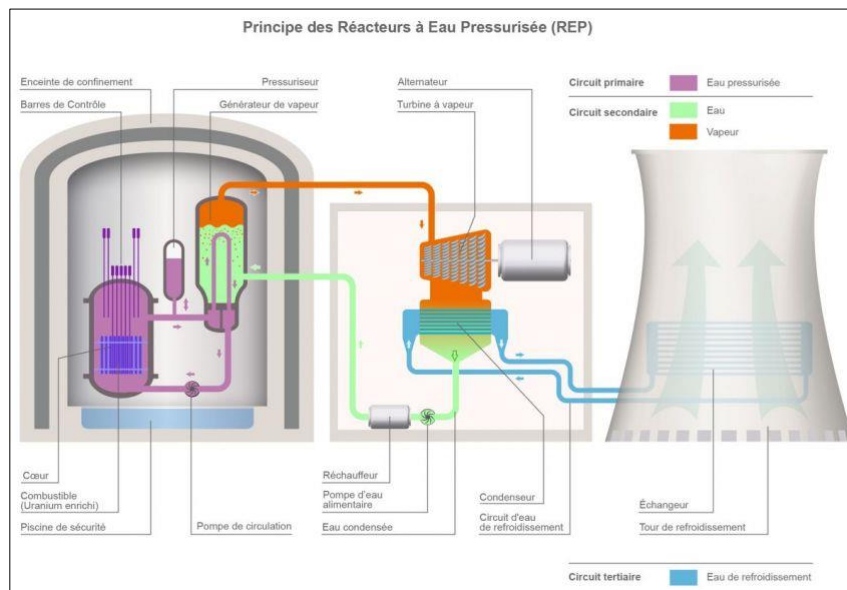
1. Le premier niveau lui laisse une entière liberté quant à ce qu'il désire réaliser en salle de contrôle;
2. Le second niveau le soumet à des ordres provenant d'un centre directeur : «Le Dispatching national»
3. Le troisième niveau le met en face d'accidents (cinq types dont un ayant des conséquences aléatoires) qu'il s'efforcera de maîtriser le mieux possible.

Dans tous les cas, sont mis à sa disposition :

- Une console qui regroupe toutes les commandes de la salle de contrôle;
- Un poste de Sécurité Radioprotection permettant de vérifier par le détail l'état de la centrale et éventuellement d'intervenir en envoyant des équipes d'ouvriers.
- Un schéma de la centrale où clignotent les organes les plus touchés.

Des systèmes de sécurité renseigneront l'utilisateur sur les risques et dégâts potentiels résultant de certaines manœuvres. Celui-ci restera malgré tout responsable des décisions à prendre. Une session se terminera toujours par un bilan destiné à évaluer l'ampleur des dégâts (matériels et humains) et noter le joueur en conséquence.

Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire «REP» (Réacteur à eau pressurisée)



Une tranche de centrale nucléaire se compose d'une enceinte de confinement abritant l'ensemble du circuit primaire et protégeant l'extérieur (à la façon d'une cocotte-minute en cas de surpression). La cuve du réacteur, abritée dans une piscine contient l'uranium (le combustible).

Une réaction nucléaire s'y produit, contrôlée par deux paramètres :

- Les barres de contrôle, glissant dans des canaux, la freinent lorsqu'elles sont abaissées dans le réacteur;
- Le taux d'acide borique qui la freine lorsqu'il est élevé.

Ladite réaction nucléaire produit de l'énergie calorifique servant à chauffer l'eau sous pression du circuit primaire (en violet sur le schéma). Ce circuit est mis sous pression grâce au pressuriseur afin d'éviter que l'eau ne se transforme en vapeur, même à 300°C. La circulation est assurée par une pompe.

L'eau chaude du circuit primaire va alors passer dans l'échangeur de chaleur où elle va chauffer l'eau d'un deuxième circuit : le circuit secondaire (orange et vert sur le schéma).

Cette eau se transforme en vapeur dans le générateur de vapeur. Cette vapeur entraîne à son tour une turbine, puis un alternateur produit l'énergie électrique; c'est la production (chiffrée en MW, jusqu'à 1400 MW). La vapeur passe ensuite dans un condenseur où elle se condense de nouveau en eau (car refroidie par de l'eau provenant du fleuve) pour retourner au générateur et ainsi de suite (bouclage). Une pompe sert bien entendu à la circulation de l'eau du circuit secondaire.

Actions possibles du joueur

La salle de contrôle

La salle de contrôle met à votre disposition toutes les commandes et les données physiques (températures, pressions, débits, radioactivités, etc.) qui vous seront utiles. Figurent aussi les cadres réservés aux ordres du dispatching et aux avertissements--sécurité qui se compose d'un message donnant l'état d'une partie de la centrale, composé du niveau de dégradation, de l'organe concerné et de la cause de cette dégradation, à savoir pour le niveau de dégradation :

- Dégradation possible
- Risque important de dégradation
- Dégradation très importante

Les organes concernés peuvent être :

- Le circuit primaire;
- Le circuit secondaire;
- La pompe du circuit primaire
- La pompe du circuit secondaire
- Le pressuriseur
- L'enceinte de confinement
- etc.

Par exemple, vous pouvez avoir comme message :

Risque important de dégradation du circuit primaire dû à la formation de vapeur

N.B : pression trop faible...

En ce qui concerne l'affichage, la salle de contrôle vous affichera en temps réel :

- Un cadre réservé aux ordres provenant du dispatching national
- Un cadre affichant la production électrique (en MW)
- Un cadre affichant le taux de bore dans la piscine
- Un cadre pour le circuit primaire affichant :
 - Le rendement de la pompe (en pourcentage)
 - La température dans le circuit (en °C)
 - Le débit d'eau (en m^3s^{-1})
 - La pression (en bar)
 - La radioactivité (en becquerel)
- Un cadre pour le circuit secondaire affichant :
 - Le rendement de la pompe (en pourcentage)
 - La température de la vapeur (n'affiche rien si pas de vapeur, sinon en °C)
 - Le débit (nul si pas de vapeur, en m^3s^{-1})
 - La pression (égale à un si pas de vapeur, en bar)
 - La radioactivité (normalement nulle si tout se passe bien, en becquerel)
- Un cadre réservé au système de sécurité (signalant les dégradations, etc.)

- Un cadre affichant la pression subit par l'enceinte de confinement (pas d'unité)
- Un cadre réservé au système de refroidissement affichant :
 - Le rendement de la pompe du condenseur (en pourcentage)
 - Le débit de l'eau dans le condenseur (en m^3s^{-1})
 - La différence de température entre la vapeur en entrée et l'eau en sortie (D.E.S, en °C) qui permet d'évaluer l'efficacité du condenseur pour refroidir l'eau dans le circuit
- Enfin un cadre affichant l'état des barres de graphite (pas d'unité)

Les commandes disponibles sont actionnées par des touches précises. Le réglage d'un paramètre s'effectue par les touches fléchées haut et bas (montée, descente). Tous ces ordres sont soumis évidemment aux états des organes qu'ils concernent (touche concernée en gras et de couleur bleue) :

- **1** : Rendement de la pompe du circuit primaire
- **2** : Rendement de la pompe du circuit secondaire
- **B** : Action sur les barres de contrôle (100% = totalement levées, 0%=totalement baissées)
- **T** : Action sur le taux d'acide borique
- **P** : Rendement pressuriseur
- **R** : Rendement pompe condenseur
- **U** : Autorise en cas d'urgence l'enfoncement rapide des barres dans le réacteur. Cette procédure comporte des risques de dégradation.
- **S** (maintenue enfoncée) : demande la fin de la session
- **Tab** : Affiche le schéma de la centrale
- **Espace** : Passage en poste sécurité radioprotection

Le poste de sécurité radio protection

Le poste de sécurité radio protection donne les états de tous les organes de la tranche. La valeur cent correspond à un état intact, zéro à une destruction complète ou à un état entravant gravement le fonctionnement.

Ainsi, un cadre est réservé au premier secteur (réacteur) affichant :

- L'état des canaux guidant les barres de graphite
- L'état des barres de graphite
- L'état de la piscine
- L'état de la cuve

Un deuxième cadre est réservé au second secteur (circuit primaire) affichant :

- L'état du circuit primaire lui-même
- L'état de la pompe

- L'état du pressuriseur (le réservoir)
- L'état des résistances électriques de chauffage du pressuriseur (qui en chauffant transforment de l'eau en gaz maintient ensuite une certaine pression dans le circuit primaire)
- L'injecteur d'acide borique

Un troisième cadre affiche l'état du circuit secondaire, à savoir :

- L'état du circuit lui-même
- L'état de la pompe
- L'état du générateur de vapeur
- L'état de l'échangeur de chaleur

Un quatrième cadre affiche l'état de l'enceinte de confinement

Enfin un cadre affiche l'état du condenseur

Un cadre affiche les effectifs humains à votre disposition : Le nombre d'ouvriers disponibles, le nombre d'ouvriers occupés et le nombre d'ouvriers blessés.

Le cadre "Activité" signale entre autres divers niveaux de contamination (piscine, air à l'intérieur de l'enceinte, rejets atmosphériques et aqueux) en becquerels pour la piscine (activité réelle), en rems ou millirems par heure (correspondant à l'influence exercée en une heure sur un être humain) pour les autres.

Le cadre "Ordinateur" donne l'état courant de la centrale et des alentours : l'E.G.C (État général centrale), le niveau d'alerte, les ouvriers actifs ou non, population évacuée/contaminée, etc.

Là encore quelques commandes sont disponibles :

- **Tab** : Affiche le schéma de la centrale
- **Espace** : Retour à la salle de contrôle
- **P** : Demande l'évacuation de la population après confirmation (celle-ci n'est effective que quelques temps plus tard)
- **B** : Bilan de l'activité ouvrière. Cette commande affiche les différents organes où sont potentiellement réalisables des interventions humaines. Le bilan reste affiché tant que la touche **B** est enfoncée. Pour chacun d'eux peut être affiché :
 - Si l'intervention est possible ou impossible
 - Le nombre possible d'ouvriers pouvant intervenir
 - Le nombre d'ouvriers en train d'intervenir en cours
- **O** : Intervention ouvriers. Sélectionnez l'organe concerné en appuyant sur la lettre correspondante. Si l'intervention est déjà en cours, vous aurez la possibilité de l'annuler (et de récupérer l'effectif). Les organes concernées sont (touche en bleue):
 - La pompe du circuit primaire (**1**)

- La pompe du circuit secondaire (2)
- Le condenseur (C)
- Le générateur de vapeur (G)
- L'injecteur d'acide borique (B)
- Le circuit primaire (I)
- Le circuit secondaire (R)
- Le pressuriseur (P)

Une intervention d'ouvrier permet de remettre en état un organe défectueux. Elle n'est bien sûr possible que si les conditions (pression, radioactivité, température) le permettent. Si celles-ci deviennent défavorables en cours d'intervention, les ouvriers affectés à la tâche seront signalés blessés et ne pourront rejoindre que petit à petit les effectifs disponibles.

Quelques remarques

La température du circuit primaire (donc en bout de chaîne, la production électrique) est dans une certaine mesure liée au débit de ce même circuit. En effet, plus l'eau stagne, plus sa température s'élève au contact de l'uranium en fission. Le réglage de la pompe du circuit primaire et de la pression détermine avec précision la production.

La demande en MW du dispatching admet une marge de plus ou moins 10MW (à maintenir pendant que dure le message donnant l'ordre).

Lorsqu'on vous demande une mise en divergence, cela signifie faire démarrer la réaction en chaîne (lever des barres, baisse du taux d'acide borique, fonctionnement des pompes, pressurisation, etc.) et la production de vapeur dans le générateur.

Toute action sur un organe principal du circuit primaire (pressuriseur, barres, bore) n'entraîne pas, on s'en doute une modification brutale des paramètres. Une certaine inertie (montées ou descentes progressives) rend la simulation réaliste... et le jeu plus ardu.

Donc procédez avec méthode et sans précipitation.

Modélisation et mise en œuvre

Temps réel et tour de jeu

Comme dit dans l'introduction, ce projet s'inspire très fortement d'un programme écrit en basic destiné pour une machine huit bits des années quatre-vingt. Par rapport à aujourd'hui, la machine était lente (multiplier par plus de mille sa vitesse de traitement des données !), et le programme était écrit à l'aide d'un langage interprété réputé par sa relative lenteur.

La boucle principale en temps (réel) qui permettait de traiter toutes les informations en temps réelles prenant donc plus d'une seconde pour faire une itération sur ce type de machine, et cela permettait donc d'avoir une simulation réaliste où le rafraîchissement des valeurs se faisait au mieux toutes les secondes, voire toutes les deux secondes.

Aujourd'hui, vous allez mettre en œuvre cette même simulation, mais avec un ordinateur mille fois plus rapide au moins, et avec un langage moderne, compilé et reconnu pour sa vitesse d'exécution. Votre boucle principale risque de se rafraîchir toutes les millisecondes au moins !

Il faudra donc temporiser votre boucle avec une instruction permettant d'attendre un certain temps de sorte que votre boucle principale fasse une itération par seconde au maximum !

Cela veut dire aussi qu'il sera inutile de chercher à optimiser votre code (autant pour la vitesse de traitement que pour la mémoire, l'ordinateur sur lequel cette simulation tournait n'avait que 128ko de mémoire vive !).

Donc, profitez-en pour faire un code clair et logique, facile à lire et à comprendre. Pour citer Donald Knuth (inventeur de TeX et auteur des grands classiques «The art of computer programming»): «L'optimisation est la racine de tout le mal.»(Optimization is the root of the evil).

Cela ne vous dispense pas néanmoins de faire attention d'éviter toute copie de données inutiles!

Variables et valeur en début de partie pour chaque organe

Attention, dans les tableaux ci-dessous, on utilise parfois des variables définies plus bas dans d'autres parties de la centrale. Cela traduit le fait qu'il y a beaucoup d'interaction dans les circuits d'une centrale nucléaire.

Les noms des variables choisis ici ne servent que pour avoir des formules concises et lisibles dans le document. Libre à vous de leur choisir un nom bien plus approprié pour votre code (et c'est même recommandé !)

La fonction RND(x) présente dans les formules renvoie un nombre aléatoire (réel en général) entre 0 et x compris.

NB : Pour utiliser les formules, on prend pour valeurs des variables les valeurs qu'on a en début de boucle en temps et non une valeur que l'on vient de calculer au sein de la boucle!

Réacteur

Variable	Explication	Paramétrable	Valeur initiale	Plage/Équation
TX_{gr}	Proportion des barres de graphite hors de l'eau demandé	Oui	0	(1.-E _{barre}) à 1. (en %)
TG_{reff}	Proportion actuelle des barres hors de l'eau demandé	Non	0%	Voir ci-dessous
TX_B	Taux de bore demandé dans l'eau du circuit	Oui	0.47	0 à 0.5 (en %)
TB_{eff}	Taux de bore actuel dans l'eau du circuit	Non	0.47	Voir ci-dessous
E_{cuve}	État de la cuve	Non	1.	0 à 1.
R_{pisc}	Radiation de la piscine en becquerel	Non	-	(1.-E _{cuve})*R ₁ +100 + RND(45)
E_{pisc}	État de la piscine	Non	1.	0 à 1.
E_{barre}	État des barres de graphite	Non	1.	0 à 1.
E_{canaux}	État des canaux guidant les barres	Non	1.	0 à 1.
E_{bore}	État injecteurs d'acide borique	Non	1.	0 à 1.

Inertie des barres de graphite : Les barres de graphites mettent un certain temps pour sortir de l'eau ou y entrer. Cela est modéliser par deux variables : $T_{x_{gr}}$ et $T_{gr_{eff}}$. Lorsque le joueur demande une modification du taux de graphite plongé dans l'eau, on initialise $T_{gr_{eff}}$ à l'ancienne valeur de $T_{x_{gr}}$ qui lui prend la valeur demandée par le joueur. Ensuite à chaque itération en temps de la boucle principale, on incrémente ou décrémente de 0.01 $T_{gr_{eff}}$ pour atteindre la valeur $T_{x_{gr}}$ demandée par le joueur.

Inertie de l'injection d'acide borique : De la même manière, on ne peut injecter instantanément l'acide borique. On utilise donc une stratégie semblable aux barres de graphite pour simuler l'inertie à l'aide des variables T_{xB} (valeur demandée) et $T_{B_{eff}}$ (valeur actuelle) et un incrément ou décrement de 0.01.

Circuit primaire

Variable	Explication	Paramétrable	Valeur initiale	Plage/Équation
EC1	État circuit primaire	Non	1	0 à 1
Ep1	État de la pompe	Non	1	0 à 1
EPress	État du pressuriseur (cuve)	Non	1	0 à 1
ERes	État de la résistance du pressuriseur	Non	1	0 à 1
EEC	État de l'échangeur de chaleur	Non	1	0 à 1
Tpress	Température du pressuriseur demandé	Oui	25°C	25 à $100 \times (E_{press} + E_{Res})$
TPeff	Température du pressuriseur actuel	Non	25°C	Voir en dessous
Fp1	Régime fonctionnement pompe	Oui	0	0 à E_{p1}
P1	Pression	Non	1 bar	$\max((TP_{eff}-25)/3.24 + (T_1 - 100)/83.3 \times (E_{C1} + 0.1) \times (E_{EC} + 0.1), 1)$
D1	Débit de l'eau	Non	$0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$E_{C1} \times E_{cuve} \times F_{p1} \times 90$
IT1	Inertie température eau circuit	Non	0	Si $(E_{EC} < 50 \text{ et } T_{B_{eff}} < 25 \text{ et } T_{GR_{eff}} < 50)$ alors $I_{T1} += \text{RND}(26)$ Si $T_{vap} < T_1$ alors $I_{T1} += (T_{vap} - T_1)/3$ sinon $I_{T1} = \max(0, I_{T1} - \text{RND}(16))$
T1	Température eau dans circuit	Non	25°C	$\text{Max}(25, (0.5 - T_{B_{eff}})/0.5 \times (645 \times T_{GR_{eff}} - 140 \times D_1/90 + 2P_1) + 26 + I_{T1})$
R1	Radioactivité circuit primaire	Non	0 becquerel	$98 \times (D_1 + 1) + \text{RND}(90) + (0.5 - T_{B_{eff}}) \times (MW + 0.1) \times 6.54$

Inertie du pressuriseur : Comme pour les barres de graphite et l'injecteur d'acide borique, le pressuriseur met un certain temps pour chauffer son eau à l'aide de sa résistance afin de créer une pression dans le circuit primaire permettant de conserver l'eau liquide malgré sa température. Cette inertie est modélisée comme les deux variables T_{Press} et TP_{eff} qui s'incrémentera ou décrémentera d'un.

Circuit secondaire

Variable	Explication	Paramétrable	Valeur initiale	Plage/Équation
----------	-------------	--------------	-----------------	----------------

E_{C2}	État du circuit secondaire	Non	1.	0. à 1.
E_{p2}	État de la pompe du circuit	Non	1.	0. à 1.
E_{vap}	État du générateur de vapeur	Non	1.	0. à 1.
E_{cd}	État du condenseur	Non	1.	0. à 1.
F_{p2}	Régime pompe du circuit	Oui	0.	0. à E _{p2}
F_{cd}	Régime pompe condenseur	Oui	0.	0. à E _{cd}
T_{vap}	Température vapeur ^(*)	Non	25°C	Max(E _{EC} ×(T ₁ /1.51)+26+(I _{T2} si I _{T2} >3),99)
P_{vap}	Pression exercée par la vapeur ^(*)	Non	1 bar	Si T _{vap} <120 : 1 bar sinon max(1, (E _{C2} +0.1)×E _{vap} ×(F _{p2} /50+(T _{vap} -135)/10))
D₂	Débit de l'eau	Non	0.	Z = E _{C2} ×(E _{cd} +0.1)×E _{vap} ×F _{p2} ×0.85 Si T _{vap} >3 et Z<3 alors D ₂ = (E _{C2} ×(E _{cd} +0.1)×E _{vap} ×1.3 Sinon D ₂ = Z
D_{cd}	Débit au niveau du condenseur	Non	0.	E _{cd} ×F _{cd} ×150
Δ_{ES}	Différence de chaleur entre l'entrée et la sortie du condenseur	Non	0.	D _{cd} /7.5
I_{T2}	Inertie chaleur de l'eau du circuit	Non	0.	Si F _{p2} <0.55+RND(0.15) et T ₁ >200 alors I _{T2} += RND(T ₁ /100) Sinon si I _{T2} >0 alors I _{T2} = Max(I _{T2} -RND(3),0)
R₂	Radioactivité du circuit secondaire	Non	0.	max(R ₂ , (1.-E _{EC})×R ₁)

(*) : On considère qu'il y a de la vapeur dans le circuit secondaire (la partie après le générateur de vapeur) si et seulement si la température de la vapeur est supérieure à 120°C

La centrale (tranche)

Variable	Explication	Paramétrable	Valeur initiale	Plage/Équation
E_{enceinte}	État de l'enceinte de confinement	Non	1.	0. à 1.
P_{enceinte}	Pression subit par l'enceinte de confinement	Non	1 bar	Si (P ₁ >8 et E _{cuve} <1 et E _{pisc} <1) ou (E _{cuve} <0.3 et E _{pisc} <0.4) alors P _{enceinte} += (2.-E _{cuve} -E _{pisc})/23. Si (E _{c1} <0.6 et P ₁ >12) ou (E _{c1} <0.2) alors P _{enceinte} += (1.-E _{c1})/30. Si (E _{vap} <0.9 et P _{vap} >2) alors P _{enceinte} += (1-E _{vap})/20 P _{enceinte} = min(P _{enceinte} ,5) Si E _{enceinte} > 0.5 et E _{enceinte} < 0.6 alors P _{enceinte} -= (1-E _{enceinte})/2×P _{enceinte} À chaque tour, 30% de chance que la P _{enceinte} baisse de 0.13 bar
R_{enceinte}	Radioactivité de l'enceinte de confinement à l'intérieur. Notez que si l'enceinte est abîmée, la radioactivité baisse dans l'enceinte (mais pas à l'extérieur !)	Non	0.00002 rem/h	R _{enceinte} = RND(1./55)+0.00002+(1-E _{c1}).R ₁ /98.98+(1-E _{press})×10 Si E _{pisc} < 0.55 et R _{pisc} > 3000 alors R _{enceinte} = 1.25×R _{enceinte} Si E _{enceinte} < 0.9 alors R _{enceinte} /= 1.3 Si E _{enceinte} < 0.1 alors R _{enceinte} /= 1.5

E_{centrale}	État général de la centrale	Non	1.	$(E_{canaux} + 2E_{barre} + 8E_{cuve} + 3E_{pisc} + E_{p1} + E_{p2} + 5E_{Ec} + 4E_{vap} + E_{press} + E_{resist} + 4E_{enceinte} + 8E_{c1} + 3E_{c2} + E_{bore} + E_{cd}) / 44$
MW	Production de la centrale	Non	0.	Si $T_{vap} < 120$ ou $E_{c2} < 0.22$ alors $MW = 0$ Si $T_{vap} < 3000$ alors $MW = \max(5.787 \times (T_{vap} - 120) + 28.118 \times (P_{vap} - 1) + P_1, 0)$ Sinon $MW = 30000$ Si $E_{c2} < 0.6$ alors $MW = MW * E_{c2}$ Si $MW > 1400$ et $MW < 1412$ alors $MW = 1400$

Remarque : Si l'état générale de la centrale est inférieur à 0.22, on considère que la centrale est détruite et le jeu se termine.

Sécurité et dégradations

Lorsque certains paramètres excèdent certaines valeurs, cela peut abîmer des organes de la centrale. Un message d'alerte est alors émis sur la console de la salle de contrôle avertissant du degré de dégradation, de l'organe concerné et de la cause.

Voici un tableau donnant les conditions sur les variables causant une dégradation, les organes concernés, le message envoyé pour chaque organe (ou général) et enfin les équations donnant la dégradation de ces organes (s'il y a dégradation). Attention, plusieurs conditions sont des sous-conditions de conditions plus générales. Il faut donc traiter à chaque fois toutes les conditions vérifiées! Notons également que cette dégradation a lieu à chaque tour si la condition est toujours vérifiée.

Sécurité sur le circuit primaire

Condition	Organes concernés	Message affiché	Équation de dégradation
$400 < T_1 < 420$	-	Température trop élevée dans le circuit primaire	
$T_1 \geq 420$	Circuit primaire	Risque important de dégradation du circuit primaire dû à la température	$E_{C1} -= \text{RND}(0.02)$
$T_1 \geq 420$ et $T_{XGr} > 0.2$	Barres de graphite	Dégradation possible des barres	$E_{barre} -= \text{RND}(0.03)$
$T_1 \geq 420$	Pressuriseur	Dégradation possible du pressuriseur	30 % de chance que $E_{press} -= \text{RND}(0.02)$ et $E_{res} -= \text{RND}(0.02)$
$T_1 \geq 40 \times P_1$	Circuit primaire	Risque important de dégradation du circuit primaire dû à la formation de vapeur dans le circuit primaire	$E_{C1} -= \text{RND}(0.03)$
$T_1 \geq 40 \times P_1$	Pressuriseur	Risque important de dégradation du pressuriseur dû à la formation de vapeur dans le circuit primaire	$E_{press} -= \text{RND}(0.02)$
$T_1 \geq 40 \times P_1$	Pressuriseur	Risque de dégradation de la résistance du pressuriseur dû à la formation de vapeur dans le circuit primaire	30% de chance que $E_{res} -= \text{RND}(0.02)$
$T_1 \geq 50$ et $E_{C1} < 0.5$	Échangeur de chaleur	Risque important de dégradation de l'échangeur de chaleur	40% de chance que $E_{EC} -= \text{RND}(0.04)$

$T_1 \geq 50$ et $E_{C1} < 0.5$	Générateur de vapeur	Risque de dégradation du générateur de vapeur	20% de chance que $E_{vap} = RND(0.02)$
$T_1 \geq 50$ et $E_{C1} < 0.58$	Pompe circuit primaire	Risque important de dégradation de la pompe du circuit primaire	50% de chance que $E_{P1} = RND(0.03)$
$T_1 \geq 50$ et $E_{press} < 0.5$	Pressuriseur	Risque très important de dégradation de la résistance du pressuriseur	80% de chance que $E_{res} = RND(0.03)$
$T_1 \geq 50$ et $E_{C1} < 0.6$	Cuve	Risque de dégradation de la cuve	40% de chance que $E_{cuve} = RND(0.02)$
$T_1 \geq 50$ et $E_{C1} < 0.3$	Cuve	Risque de forte dégradation de la cuve	30% de chance que $E_{cuve} = RND(0.03)$
$T_1 \geq 50$ et $E_{C1} < 0.2$	Cuve	Risque très important de très forte dégradation de la cuve	80% de chance que $E_{cuve} = RND(0.06)$
$T_1 \geq 50$ et $E_{C1} < 0.2$	Piscine	Risque très important de dégradation de la piscine	80% de chance que $E_{pisc} = RND(0.06)$
$T_1 \geq 50$ et $P_1 > 10$	Circuit primaire	Risque faible de dégradation du circuit primaire dû à une pression trop forte	20% de chance que $E_{C1} = RND(0.02)$
$T_1 \geq 50$, $E_{cuve} < 0.7$ et $T_{Greff} > 0.4$	Barres de graphite	Risque important de dégradation des barres de graphite	40% de chance que $E_{barre} = RND(0.03)$
$T_1 \geq 50$ et $E_{cuve} < 0.5$	Canaux	Risque important de dégradation importante des canaux	50% de chance que $E_{canaux} = RND(0.05)$
$T_1 \geq 50$ et $E_{EC} < 0.6$	Circuit primaire	Risque faible de dégradation faible du circuit primaire	30% de chance que $E_{C1} = RND(0.015)$
$T_1 \geq 50$, $E_{EC} < 0.6$ et $P_1 > 3$	Générateur de vapeur	Risque important de dégradation du générateur de vapeur	50% de chance que $E_{vap} = RND(0.02)$
$T_1 \geq 50$, $E_{canaux} < 0.6$ et $T_{Greff} > 0.4$	Barres de graphite	Risque de dégradation des barres de graphite	30% de chance que $E_{barre} = RND(0.02)$
$T_1 \geq 50$, $E_{cuve} < 0.5$ et $E_{C1} < 0.5$	Injecteur d'acide borique	Risque important de dégradation de l'injecteur d'acide borique	50% de chance que $E_{bore} = RND(0.02)$

Sécurité du circuit secondaire

Remarquons tout d'abord que s'il n'y a pas de vapeur ($T_{vap} < 120^\circ\text{C}$), aucun organe du circuit secondaire ne peut s'abîmer.

Condition	Organe concerné	Message affiché	Équation de dégradation
$E_{EC} < 0.7$	Échangeur de chaleur	Problème d'échange entre le circuit primaire et le circuit secondaire	-
$E_{EC} < 0.4$	Échangeur de chaleur	Risque important de dégradation de l'échangeur de chaleur	25% de chance que $E_{vap} = RND(0.03)$
$T_{vap} \geq 310^\circ\text{C}$	Circuit secondaire	Risque important de dégradation du circuit secondaire à cause de la température	25% de chance que $E_{C2} = RND(0.04)$
$\Delta_{ES} < 11$ et $T_{vap} \geq 130^\circ\text{C}$	Circuit secondaire	Risque possible de dégradation du circuit secondaire dû au	-

		refroidissement	
$E_{C2} < 0.5$ et $T_{vap} > 130^{\circ}\text{C}$	Circuit secondaire	Risque important de dégradation du circuit secondaire	30% de chance que $E_{C2} \text{ --} \text{RND}(0.015)$
$E_{C2} < 0.6$	Pompe circuit secondaire	Risque important de dégradation de la pompe du circuit secondaire	30% de chance que $E_{P2} \text{ --} \text{RND}(0.02)$
$E_{C2} < 0.4$	Générateur de vapeur	Risque important de dégradation du générateur de vapeur	40% de chance que $E_{vap} \text{ --} \text{RND}(0.02)$

Autres alertes de sécurité

Condition	Organe concerné	Message affiché	Équation de dégradation
$\Delta_{ES} > 19$	Condenseur	Dégradation potentielle du condenseur à cause de la différence de température	40% de chance que $E_{CD} \text{ --} \text{RND}(0.03)$
$2 < P_{enceinte} < 3.4$	Enceinte de confinement	Dégradation potentielle de l'enceinte de confinement dû à la pression	
$2 < P_{enceinte} < 3.4$ et $E_{enceinte} > 0.5$	Enceinte de confinement	Dégradation potentielle de l'enceinte de confinement dû à la pression	30% de chance que $E_{enceinte} \text{ --} \text{RND}(0.02)$
$3.4 \leq P_{enceinte} < 4.5$	Enceinte de confinement	Risque important de dégradation de l'enceinte de confinement dû à la pression	
$3.4 \leq P_{enceinte} < 4.5$ et $E_{enceinte} > 0.25$	Enceinte de confinement	Risque important de dégradation de l'enceinte de confinement dû à la pression	60% de chance que $E_{enceinte} \text{ --} \text{RND}(0.06)$
$E_{enceinte} = 0$ ou $P_{enceinte} \geq 4.5$	Enceinte de confinement	Destruction totale de l'enceinte de confinement	(voir plus bas pour la pollution radioactive)

Si l'état de la centrale est inférieur à 0.22, on considère la centrale comme complètement détruite, si son état est inférieur à 0.30, on considère que sa destruction est imminente, si son état est entre 0.3 et 0.5, on est dans un état d'urgence de niveau 2 (DEFCON 2), si son état est entre 0.5 et 0.6, on est dans un état d'urgence de niveau 1 (DEFCON 1) ...

Les ouvriers

Lorsque certains organes de la centrale sont abîmés, il est nécessaire de les faire réparer.

On dispose au départ de 145 ouvriers. Lorsqu'on demande de faire une réparation spécifique, il est nécessaire d'envoyer un nombre d'ouvrier précis. Ainsi, il faut :

- Huit ouvriers pour réparer la pompe du circuit primaire ou secondaire
- Vingt ouvriers pour réparer le condensateur
- Soixante ouvriers pour réparer le générateur de vapeur
- Cinq ouvriers pour réparer l'injecteur d'acide borique

- Vingt ouvriers pour réparer le circuit secondaire
- Dix ouvriers pour réparer le pressuriseur
- Quarante-cinq ouvriers pour réparer le circuit primaire

Selon la qualité de l'environnement, les ouvriers peuvent ou non tomber malade. Un ouvrier malade a 40% de chance de guérir tous les huit tours de jeu.

Les ouvriers ne peuvent intervenir que si l'environnement n'est pas trop hostile. Ainsi :

- Si $E_{C1} < 0.2$, intervention sur le circuit primaire impossible
- Tous les cinq tours, il y a 10 % de chance qu'un à tous les ouvriers travaillant sur le générateur de vapeur soi(en)t blessé(s).
- Si $R_{enceinte} > 12$ ou $P_{enceinte} > 3$, intervention impossible. Si les ouvriers sont déjà sur le chantier, ils se retrouvent tous blessés.
- Si $T_{vap} > 300$ ou $MW > 1000$: intervention impossible. Si les ouvriers sont déjà sur le chantier, ils se retrouvent tous blessés.

A chaque tour, il y a 30% de chance que l'état de l'organe s'améliore dû à la réparation des ouvriers :

- Pour les pompes : Si leur état est > 0.97 , on arrive automatiquement à 1 sinon on améliore l'état de la pompe de $RND(0.03)$
- Pour le condenseur : Si son état est > 0.98 , on arrive automatiquement à 1, sinon on améliore de $RND(0.02)$
- Pour le générateur de vapeur : Si son état est < 0.89 , on l'améliore de $RND(0.05)$. On le considère comme réparé si son état est ≥ 0.89
- Pour l'injecteur de Bore : si son état est < 0.96 , on l'améliore de $RND(0.04)$. On le considère comme réparé si son état est ≥ 0.96
- Pour le circuit secondaire : Si son état est < 0.78 , on améliore de $RND(0.02)$ sinon on le considère comme réparé
- Pour le circuit primaire : si son état est < 0.8 , on l'améliore de $RND(0.02)$ sinon on le considère comme réparé
- Pour le pressuriseur : si son état est < 0.97 , on l'améliore de $RND(0.03)$ et on améliore l'état de la résistance de $RND(0.04)$ sinon on considère que tout est de nouveau à 1. (Nota : la résistance ne peut avoir un état supérieur à l'état du pressuriseur) ;

Lorsqu'un organe de la centrale est réparé, les ouvriers qui réparaient cet organe sont de nouveau disponibles.

Destruction totale de l'enceinte de confinement

Lorsque l'enceinte de confinement est totalement détruite (voir plus haut), plusieurs dégradations sont occasionnées à chaque tour de jeu :

- E_{vap} se dégrade de $0.1 + RND(0.1)$

- Si $E_{vap} < 0.4$: Affiche détérioration importante du générateur de vapeur
 $E_{vap} = 0.1 + \text{RND}(0.1)$
- 80% dégradation circuit primaire : Affiche détérioration importante du circuit primaire et du pressuriseur
 - $E_{C1} = 0.1 + \text{RND}(0.1)$
 - $E_{press} = 0.1$
 - Si $E_{press} < 0.9$, 80% de chance que $E_{res} = \text{RND}(0.1)$
- 65% de chance d'une dégradation de la cuve et de la piscine :
 - Affiche message détérioration importante de la cuve et de la piscine
 - $E_{pisc} = 0.6 + \text{RND}(0.16)$
 - $E_{cuve} = 0.5 + \text{RND}(0.1)$

Tentative d'arrêt d'urgence

Pour éviter une catastrophe nucléaire, il est possible de tenter un arrêt d'urgence (qui consiste à noyer les barres d'uranium dans l'acide borique afin d'absorber un max de neutron et arrêter la réaction nucléaire). Évidemment, si certaines parties de la centrale (surtout les canaux et les barres d'uranium) sont abîmées, la tentative peut échouer.

La probabilité de réussite est (probabilité entre 0 et 1.) de : $0.7 \times E_{cuve} \times E_{canaux} \times E_{barre} + 0.15$

Si la tentative est réussie, les barres commencent à descendre (objectif T_{GReff} à 0)

Si la tentative échoue, on risque d'abîmer une partie du circuit primaire :

- 80% de chance d'abîmer les canaux : $E_{canaux} = 0.05 + \text{RND}(0.1)$
- 30% de chance d'abîmer les barres d'uranium : $E_{barre} = 0.02 + \text{RND}(0.08)$
- 40% de chance d'abîmer la cuve : $E_{cuve} = \text{RND}(0.08)$

Gestion de la population

Une variable Evac donne le pourcentage de la population autour de la centrale nucléaire qui a été évacuée (variable entre 0 et 1.)

Initialement, Evac vaut 0. et quand Evac vaut un, c'est que toute la population a été évacuée.

Nous avons déjà calculé la radioactivité du circuit primaire, du circuit secondaire et de l'enceinte de confinement. Pour la population, on rajoute la radioactivité de l'air et de l'eau autour de la centrale : R_{air} et R_{eau} exprimés en rems/h (ou milli rems/h)

Voici le calcul de ces deux valeurs :

Si $E_{enceinte} > 0.97$ alors $R_{air} = 0$ (pas de fuite extérieure)

Sinon $R_{air} = (1 - E_{enceinte}) \times R_{enceinte} + (1 - E_{C2}) \times 10$

Si $E_{cd} > 0.9$ ou $R_{C2} < 2$: $R_{eau} = 0$ sinon $R_{eau} = (1 - E_{cd}) \cdot R_{C2} / 100$

Si la population est en cours d'évacuation (à votre demande), à chaque tour, il y a 40% de chance que 10% de la population initiale soit évacuée (Evac += 0.1)

Si il reste encore des gens autour de la centrale (Evac < 1), alors on met à jour le taux de contamination de la population (initialement à zéro):

Si $R_{enceinte} < 0.1$ alors contamination -= 5.($R_{air}>6$)-5.($R_{eau}>1$)-8.($R_{eau}>12$)-10.($R_{air}>12$)

Si $R_{air} > 12$ alors contamination += 4 + RND(15)

Si $R_{eau}>12$ alors contamination += 5 + RND(20)

Si $R_{air}>20$ alors contamination += 12 + RND(20)

Si contamination entre 10 et 600 : Contamination radioactive légère de la population

Si contamination entre 600 et 800 : Contamination radioactive importante de la population

Si contamination supérieure à 800 : Population gravement contaminée

Le dispatching

A partir du niveau deux du jeu, on reçoit de temps à autre des ordres venus d'un commandement central afin de régulariser la production nationale d'électricité. À vous de les suivre le plus fidèlement possible.

Le premier ordre au début du jeu sera toujours la mise en divergence de la centrale (démarrage du réacteur, etc.). Dès que la température de la vapeur dépasse les 140°C, et que la centrale commence donc à produire de l'électricité, on commencera à recevoir des ordres. Attention, si pour une raison ou pour une autre, la température de la vapeur rebaisse en dessous de 140°C, on continuera néanmoins à recevoir des ordres.

A chaque tour de jeu, il y a 40% de chance qu'on vous demande de produire pour le besoins nationaux un certain nombre de MW (entre 900 et 1400MW). Tant que ce but n'est pas atteint (à 10MW près), il n'y aura pas d'autres ordres. Dès l'ordre émit, on compte le nombre de tour avant que le joueur arrive à atteindre l'objectif demandé, à 10MW près. Au bout de huit tours, si le but n'est pas atteint, on commence à décrémente d'un le score du joueur (qui commence à 100). Si on n'a toujours pas atteint le but visé au bout de 16 tours, on peut recevoir un contre-ordre (20 % de chance) qui demande un autre nombre de MW entre 100 et 1400MW. Au bout de cinquante tours, on vous demande d'accélérer la procédure et vous commencez à perdre six points par tour. Au bout de soixante-cinq tours (si le score n'est pas nul), on vous retranche trois points et l'ordre se termine.

Si vous atteignez l'objectif demandé, il faut le maintenir pendant quinze tours, après quoi on vous rajouter 10 à votre score.

Le jeu s'arrête automatiquement dans ce mode si votre score atteint zéro (vous êtes viré) ou bien si la centrale ne produit plus d'électricité pendant six tours (après sa mise en divergence), le jeu a 50% de s'arrêter à chaque tour et on affiche alors le bilan (voir bilan).

Bien sûr, le joueur peut demander d'arrêter à n'importe quel moment dans les trois modes, et le bilan est alors affiché

Les catastrophes

Lorsqu'on choisit le niveau le plus élevé pour jouer, il arrive parfois qu'une catastrophe se produit indépendamment de votre volonté. Tant que la production est en dessous de 900MW, aucune catastrophe ne peut se produire. Sinon, tous les dix tours, il y a 20% de chance qu'une catastrophe se produise !

Une catastrophe suivra un des cinq scénarios possibles :

- Pour une raison inexplicable, le circuit primaire vient d'être très gravement endommagé. Les dégâts s'étendent jusqu'au pressuriseur. L'échangeur est légèrement touché. La piscine est fissurée. État d'alerte maximal.
 - ✓ État circuit primaire : $0.3 + \text{RND}(0.15)$
 - ✓ État du pressuriseur : $0.65 + \text{RND}(0.15)$
 - ✓ État de la pompe du circuit primaire : $E_{C1} + \text{RND}(0.03)$
 - ✓ $E_{EC} = 0.1 + \text{RND}(0.15)$
 - ✓ $E_{pisc} = 18$
 - ✓ $E_{cuve} = 0.03 + \text{RND}(0.1)$,
 - ✓ $E_{bore} = 0.5 + \text{RND}(0.25)$
 - ✓ $E_{barre} \neq 1.5$
 - ✓ $E_{res} = E_{press}$
- La cuve et la piscine viennent de se dégrader subitement. Les barres, les canaux et le circuit primaire sont également touchés. Le générateur est fissuré mais l'échangeur est intact. La situation est très alarmante.
 - ✓ $E_{pisc} = 0.5 - \text{RND}(0.15)$
 - ✓ $E_{cuve} = 0.55 - \text{RND}(0.07)$
 - ✓ $E_{barre} = 0.2 + \text{RND}(0.02)$
 - ✓ $E_{pisc} = 0.5 - \text{RND}(0.15)$
 - ✓ $E_{cuve} = 0.55 - \text{RND}(0.07)$
 - ✓ $E_{barre} = 0.20 + \text{RND}(0.02)$
 - ✓ $E_{canaux} \neq 1.5$
 - ✓ $E_{C1} = 0.1 + \text{RND}(0.13)$
 - ✓ $E_{press} = 3$,
 - ✓ $E_{res} = 4$
 - ✓ $E_{vap} = 0.03 + \text{RND}(0.1)$
 - ✓ $E_{bore} = 0.08 + \text{RND}(0.1)$

- Une fuite vient d'endommager gravement le système producteur de vapeur. L'ensemble primaire est peu touché mais le secondaire et l'enceinte ont été dégradés. Situation dangereuse, contamination possible.

- ✓ $E_{vap} = 0.40 + RND(0.1)$
- ✓ $E_{EC} = 0.50 + RND(0.03)$
- ✓ $E_{enceinte} = RND(0.03)$
- ✓ $E_{C2} = 0.25 + RND(0.03)$
- ✓ $E_{cd} = 0.03$
- ✓ $E_{P2} = 0.04 + RND(0.03)$
- ✓ $E_{bore} = RND(1.) \times E_{bore}$
- ✓ $E_{barre} = 0.2 + RND(0.1)$

- Un avion vient de percuter l'enceinte de confinement. Elle est partiellement détruite. L'ensemble primaire est gravement touché. Des projections ont endommagé le circuit secondaire et surtout le condenseur.

- ✓ $E_{enceinte} = 2.5$
- ✓ $E_{pisc} = 1.5$
- ✓ $E_{cuve} = 0.2$
- ✓ $E_{vap} = 0.14 + RND(0.03)$
- ✓ $E_{EC} = 0.03 + RND(0.12)$
- ✓ $E_{C1} = 0.2 + RND(0.15)$
- ✓ $E_{barre} = 1.2$
- ✓ $E_{P1} = RND(1.) \times E_{P1}$
- ✓ $E_{P2} = 1.3$
- ✓ $E_{C2} = 0.08 + RND(0.1)$
- ✓ $E_{cd} = E_{cd}/2 - RND(0.14)$
- ✓ $E_{bore} = E_{bore}/1.4 - RND(0.1)$

- 5. Un tremblement de terre d'une violence exceptionnelle a frappé la région. La centrale est touchée. Les dégâts sont multiples et impossibles à localiser. La situation est catastrophique.

- ✓ $E_{enceinte} = 2.6$
- ✓ $E_{cd} = 2.6$
- ✓ $E_{pisc} = 0.3 + RND(0.3)$
- ✓ $E_{cuve} = 0.2 + RND(0.3)$

- ✓ $E_{\text{vap}} = 10 + \text{RND}(0.1)$
- ✓ $E_{P1} \neq 1.6$
- ✓ $E_{C1} = 0.2 + \text{RND}(0.8)$
- ✓ 50% de chance que $E_{C2} \neq 1.4$ et $E_{P2} \neq 2$.
- ✓ 70% de chance que $E_{C1} \neq 1.4$
- ✓ 40% de chance que $E_{\text{bore}} \neq 3.2$
- ✓ 30% de chance que $E_{\text{canaux}} \neq 1.5$ et $E_{\text{barre}} \neq 2.4$

Le bilan

A la fin du jeu, on affiche le bilan de la cession, à savoir :

- L'état de la centrale (E_{centrale}) :
 - $E_{\text{centrale}} > 0.80$: la centrale est en bon état
 - $0.80 \geq E_{\text{centrale}} > 0.50$: La centrale assez endommagée
 - $0.50 \geq E_{\text{centrale}} > 0.20$: La centrale est presque détruite
 - $E_{\text{centrale}} < 0.20$: La centrale est détruite
- Au niveau deux du jeu, on évalue aussi votre performance avec le dispatching :
 - Si votre nombre de points > 8 , tes performances sont jugées correctes
 - Sinon si votre nombre de points est > 5 , tes performances sont jugées moyennes
 - et sinon elles sont jugées décevantes.
- On affichera aussi le nombre de MW moyen produit pendant la session
 - Si cette production est $< 300\text{MW}$, on jugera que c'est une faible production
 - Sinon si elle est $< 900\text{MW}$, elle sera jugée peu rentable,
 - Sinon si elle est $< 1200\text{MW}$ elle sera jugée correcte
 - Sinon si elle est $< 1400\text{MW}$ elle sera jugée excellente
 - Et sinon elle sera jugée hors norme !
- On affichera ensuite les diverses contaminations radioactives (dans la centrale et autour de la centrale) ainsi que l'état moyen du réacteur, du circuit primaire et secondaire.