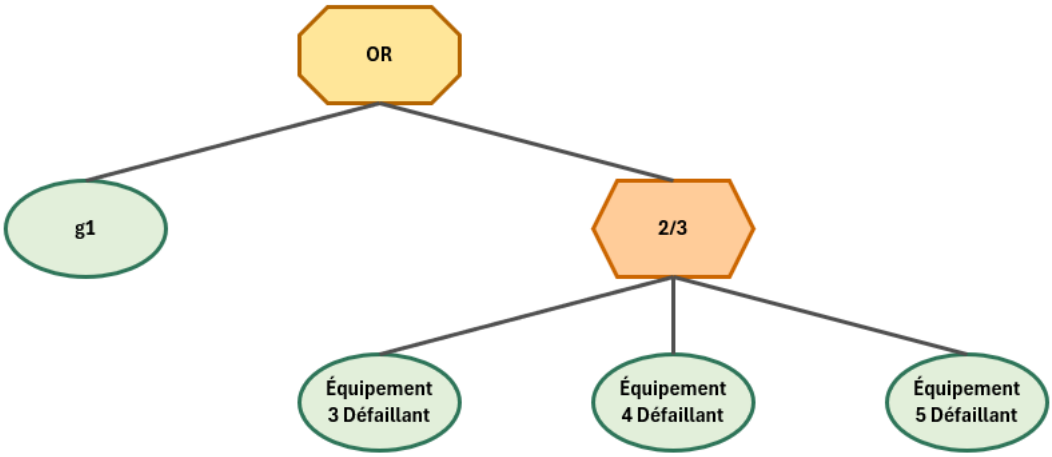
New CABTREE Version 1

sous Microsoft EXCEL ®



Arbres de Fautes (CEI 61025 / ARP4761)

Manuel utilisateur

CAB INNOVATION
S.A.R.L. au Capital de 7 622 € - Code APE 722 Z - n° SIRET 428 854 871 00012
Siège social : 3 rue de la coquille, 31500 Toulouse – Tel : 05 61 54 68 08
Courriel : contact@cabinnovation.com
Site : cabinnovation.com

AVERTISSEMENT

Le logiciel ***Cabtree*** et son manuel utilisateur sont protégés par la loi du copyright et par les conventions internationales. Leur reproduction ou distribution partielle ou totale, par quelque moyen que ce soit, est strictement interdite. Toute personne qui ne respecte pas ces dispositions se rend coupable d'un délit de contrefaçon et est passible des peines prévues par la loi.

Sommaire

Table des matières

1. Introduction théorique et caractéristiques de l'outil 4
2. Architecture des données et feuilles du classeur 5
3. Guide pas-à-pas de modélisation 6
4. Bibliothèque des lois de fiabilité & de maintenance 7
5. Exploitation des résultats 8
Annexe technique : Exemple d'application aéronautique 11
CONTRAT DE LICENCE D'UTILISATION DU PROGICIEL CABTREE 12

1. Introduction théorique et caractéristiques de l'outil

1.1. La modélisation par Arbre de Fautes (FTA)

L'Analyse par Arbre de Fautes (*Fault Tree Analysis* — FTA) est une méthode déductive descendante (*Top-Down*) standardisée selon les normes **CEI 61025** et **ARP4761**. Elle permet d'analyser et de quantifier l'ensemble des combinaisons d'événements conduisant à un événement redouté unique, dénommé **Événement Sommet** (*Top Event*).

Le comportement logique du système est formulé sous la forme d'une fonction booléenne liant les défaillances des composants élémentaires (**Événements de Base**) et des macro-composants hiérarchiques (**Sous-systèmes**) jusqu'au Top Event.

Décomposition pivotale de Shannon et mémoïsation

En présence d'événements répétés (composants communs intervenant dans plusieurs branches logiques), la propagation probabiliste indépendante conduit à une surévaluation erronée du risque. Le solveur **CABTREE** applique le théorème de décomposition pivotale de Shannon :

$$Q(\phi) = q_i \cdot Q(\phi \mid X_i = 1) + (1 - q_i) \cdot Q(\phi \mid X_i = 0)$$

où :

- $q_i = P(X_i = 1)$ est la probabilité d'occurrence de l'événement de base X_i,
- $Q(\phi \mid X_i = 1)$ est la fonction de structure conditionnée à la défaillance du composant i,
- $Q(\phi \mid X_i = 0)$ est la fonction de structure conditionnée au fonctionnement nominal du composant i.

Le solveur intègre une table de mémoïsation dynamique mémorisant les sous-expressions déjà réduites pour éliminer tout risque d'explosion combinatoire.

1.2. Éléments constitutifs et portes logiques

Entité / Porte	Symbole CABTREE	Équation Booléenne	Calcul Probabiliste Exact (Entrées indépendantes)
ET (AND)	*	$S = a \cdot b \cdot \ldots$	$P(S) = \prod_i P\,(a_i)$ *(Redondance active)*

Entité / Porte	Symbole CABTREE	Équation Booléenne	Calcul Probabiliste Exact (Entrées indépendantes)
OU (OR)	+	$S = a + b + \cdots$	$P(S) = 1 - \prod_i (1 - P(a_i))$ *(Point de panne unique)*
OU Exclusif (XOR)	^	$S = a \oplus b$	$P(S) = P(a)(1 - P(b)) + (1 - P(a))P(b)$
NON (NOT)	~	$S = \bar{a}$	$P(S) = 1 - P(a)$ *(Inhibiteur / Condition d'invalidation)*
VOTE (k/n)	k(a,b,c...)	Vote majoritaire k parmi n	Décomposition automatique en $\binom{n}{k}$ combinaisons canoniques
Sous-système	G1, G2, ...	Hiérarchie modulaire	Substitution récursive descendante (jusqu'à 30 niveaux de profondeur)

1.3. Architecture et points forts de l'outil

- **Compilateur logique AST (*Abstract Syntax Tree*) :** Analyseur syntaxique avec validation dynamique de la grammaire booléenne, contrôle du parenthésage et détection automatique des boucles récursives.
- **Moteur MOCUS optimisé avec Cut-off :** Extraction systématique des coupes minimales de défaillance (*Minimal Cut Sets* — MCS), simplification par absorption booléenne ($A + A \cdot B = A$) et élimination des coupes de probabilité inférieure au seuil de troncature réglable (défaut : 10^{-12}).
- **Analyse de criticité normée :** Calcul conjoint du facteur structurel de Birnbaum (I^B) et du facteur de Fussell-Vesely (I^{FV}), assorti de la génération automatique du diagramme de Pareto.
- **Génération graphique vectorielle :** Rendu direct de l'arbre dans Excel via les connecteurs et formes natives conformes à la CEI 61025.
- **Rapport industriel automatisé :** Génération en un clic des dossiers de justification de sécurité aux formats Word (.docx) et PDF (.pdf).

2. Architecture des données et feuilles du classeur

Le classeur s'articule autour de trois modules principaux :

1. FaultTree_Input **:** Interface de saisie. Reçoit l'expression du Top Event, les équations des sous-systèmes, le paramétrage des lois des événements de base et héberge la barre de commande principale.
2. FaultTree_CutSets **:** Tableau de bord analytique. Présente la probabilité globale Q_{TOP}, l'inventaire exhaustif et ordonné des coupes minimales ainsi que le classement Pareto des facteurs d'importance.
3. FaultTree_Diagram **:** Feuille de rendu vectoriel. Trace automatiquement l'arborescence complète (Top Event et sous-systèmes décomposés) avec mise en page hiérarchique.

3. Guide pas-à-pas de modélisation

Étape 1 — Configuration initiale

1. Ouvrez le classeur CABTREE.xlsm.
2. Sélectionnez la langue de travail (**Français**, **English**, **Español**).
3. Activez **Example** pour charger le cas d'école aéronautique, ou laissez la case vide pour initialiser une analyse vierge.

Étape 2 — Saisie des expressions logiques (FaultTree_Input)

DONNÉES DE L'ARBRE DE FAUTES

Événement Top : Perte du Système de Sécurité
Expression Logique : (G1+G2)*~d
Contrôle Syntaxe : *OK*
Probabilité :

Calculer | DESSINER | COUPES | RAPPORT
Ajout Événement | Ajout Sous-syst. | Suppr. Ligne

SYNTAXE : Opérateurs : [* = ET] [+ = OU] [^ = XOR] [~ = NON] [k(a,b,c) = Vote k/n] [( ) = Parenthèses]
Règle Sous-systèmes : Utiliser uniquement G(n-i) dans Gn (ex. G2 peut appeler G1, mais pas G2 ou G3).
Lois : Exponentielle (P1=Lambda, P2=t) | Weibull (P1=Beta, P2=Eta, P3=t, P4=Gamma) | Normale (P1=Moyenne, P2=Écart-type, P3=x) | Périodique (P1=Lambda, P2=T)

SOUS-SYSTÈMES

ID	Nom du Sous-système	Expression Logique	Contrôle Syntaxe	Proba
G1	Sous-système 1	a*b*c	*OK*	
G2	Sous-système 2	G1+2(c,d,e)	*OK*	

ÉVÉNEMENTS DE BASE

ID	Nom de l'Événement	Proba	Distribution	Paramètre 1	Paramètre 2	Paramètre 3	Paramètre 4
a	Équipement 1 Défaillant		Exponential	0,0001	1000		
b	Équipement 2 Défaillant		Weibull	1,5	5000	2000	0
c	Équipement 3 Défaillant		Exponential_Repairable	0,0002	0,05		
d	Équipement 4 Défaillant		Exponential_Periodic	0,00001	720		
e	Équipement 5 Défaillant		Constant				

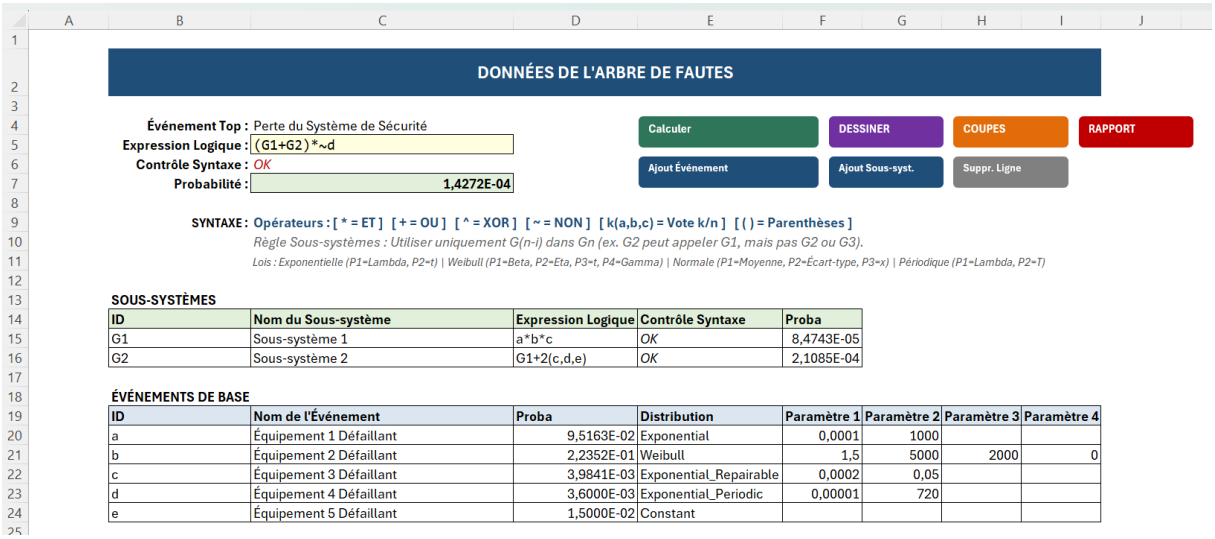
- **Événement Top :** Renseignez son intitulé ainsi que son expression logique globale (ex. : (G1+G2)*~d).
- **Sous-systèmes (G1, G2...) :** Définissez chaque bloc modulaire intermédiaire (ex. : G1 = a*b*c et G2 = G1+2(c,d,e)).
- **Contrôle syntaxique :** La cellule adjacente indique OK ou identifie l'erreur de grammaire (variable non déclarée, parenthèse fermante omise, référence circulaire).

4. Bibliothèque des lois de fiabilité & de maintenance

Pour chaque événement élémentaire, renseignez son libellé, sélectionnez le modèle dans la liste déroulante **Distribution** et définissez les paramètres requis :

Modèle	Paramètre 1	Paramètre 2	Paramètre 3	Paramètre 4	Formule analytique de l'indisponibilité Q(t)
Constant	Q	—	—	—	$Q = P_1$
Exponential	$\lambda\ (\mathrm{h}^{-1})$	t (h)	—	—	$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
Exp_Repairable	$\lambda\ (\mathrm{h}^{-1})$	$\mu\ (\mathrm{h}^{-1})$	—	—	$Q = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$ $\approx \lambda \cdot \mathrm{MTTR}$
Exp_Periodic	$\lambda\ (\mathrm{h}^{-1})$	T_{test} (h)	—	—	$Q_{\mathrm{moyen}} \approx \frac{\lambda \cdot T_{\mathrm{test}}}{2}$
Weibull	β (forme)	η (échelle h)	t (mission h)	γ (décalage h)	$Q(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right]$
Normal	μ (moyenne)	σ (écart-type)	x (seuil)	—	$Q(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$
Lognormal	$\mu_{\ln}$	$\sigma_{\ln}$	x (seuil)	—	$Q(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln}}{\sigma_{\ln}}\right)$
Triangular	a (min)	b (max)	c (mode)	x (seuil)	$F(x)$ selon la loi de répartition triangulaire

Cliquez sur le bouton **Calculer** pour résoudre les probabilités individuelles Q_i et propager les calculs à l'ensemble du modèle.



DONNÉES DE L'ARBRE DE FAUTES

Événement Top : Perte du Système de Sécurité
Expression Logique : (G1+G2)*~d
Contrôle Syntaxe : OK
Probabilité : 1,4272E-04

Calculer | DESSINER | COUPES | RAPPORT
Ajout Événement | Ajout Sous-syst. | Suppr. Ligne

SYNTAXE : Opérateurs : [* = ET] [+ = OU] [^ = XOR] [~ = NON] [k(a,b,c) = Vote k/n] [( ) = Parenthèses]
Règle Sous-systèmes : Utiliser uniquement G(n-i) dans Gn (ex. G2 peut appeler G1, mais pas G2 ou G3).
Lois : Exponentielle (P1=Lambda, P2=t) | Weibull (P1=Beta, P2=Eta, P3=t, P4=Gamma) | Normale (P1=Moyenne, P2=Écart-type, P3=x) | Périodique (P1=Lambda, P2=T)

SOUS-SYSTÈMES

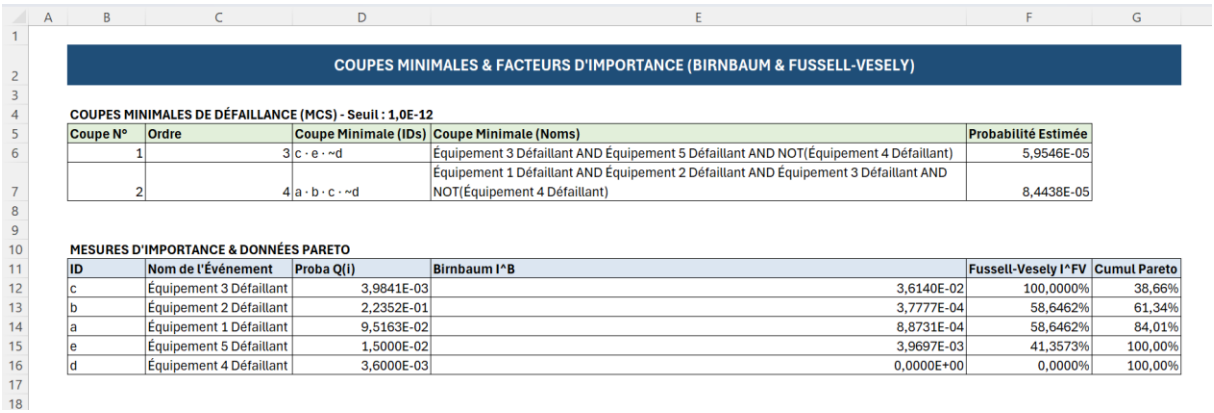
ID	Nom du Sous-système	Expression Logique	Contrôle Syntaxe	Proba
G1	Sous-système 1	a*b*c	*OK*	8,4743E-05
G2	Sous-système 2	G1+2(c,d,e)	*OK*	2,1085E-04

ÉVÉNEMENTS DE BASE

ID	Nom de l'Événement	Proba	Distribution	Paramètre 1	Paramètre 2	Paramètre 3	Paramètre 4
a	Équipement 1 Défaillant	9,5163E-02	Exponential	0,0001	1000		
b	Équipement 2 Défaillant	2,2352E-01	Weibull	1,5	5000	2000	0
c	Équipement 3 Défaillant	3,9841E-03	Exponential_Repairable	0,0002	0,05		
d	Équipement 4 Défaillant	3,6000E-03	Exponential_Periodic	0,00001	720		
e	Équipement 5 Défaillant	1,5000E-02	Constant				

5. Exploitation des résultats

5.1. Coupes minimales (MCS) et seuil de troncature



COUPES MINIMALES & FACTEURS D'IMPORTANCE (BIRNBAUM & FUSSELL-VESELY)

COUPES MINIMALES DE DÉFAILLANCE (MCS) - Seuil : 1,0E-12

Coupe N°	Ordre	Coupe Minimale (IDs)	Coupe Minimale (Noms)	Probabilité Estimée
1	3	c · e · ~d	Équipement 3 Défaillant AND Équipement 5 Défaillant AND NOT(Équipement 4 Défaillant)	5,9546E-05
2	4	a · b · c · ~d	Équipement 1 Défaillant AND Équipement 2 Défaillant AND Équipement 3 Défaillant AND NOT(Équipement 4 Défaillant)	8,4438E-05

MESURES D'IMPORTANCE & DONNÉES PARETO

ID	Nom de l'Événement	Proba Q(i)	Birnbaum I^B	Fussell-Vesely I^FV	Cumul Pareto
c	Équipement 3 Défaillant	3,9841E-03	3,6140E-02	100,0000%	38,66%
b	Équipement 2 Défaillant	2,2352E-01	3,7777E-04	58,6462%	61,34%
a	Équipement 1 Défaillant	9,5163E-02	8,8731E-04	58,6462%	84,01%
e	Équipement 5 Défaillant	1,5000E-02	3,9697E-03	41,3573%	100,00%
d	Équipement 4 Défaillant	3,6000E-03	0,0000E+00	0,0000%	100,00%

Un clic sur le bouton **COUPES** lance l'algorithme MOCUS :

- Le tableau liste l'ensemble des combinaisons minimales suffisantes pour déclencher le Top Event, triées par ordre de criticité croissant.
- Les coupes dont la probabilité combinée est inférieure au seuil (défaut : 10^{-12}) sont écartées.
- La probabilité exacte Q_{TOP} est calculée par l'union probabiliste exacte des coupes.

5.2. Facteurs d'importance (Birnbaum & Fussell-Vesely) et Pareto

La criticité de chaque événement est quantifiée selon deux métriques :

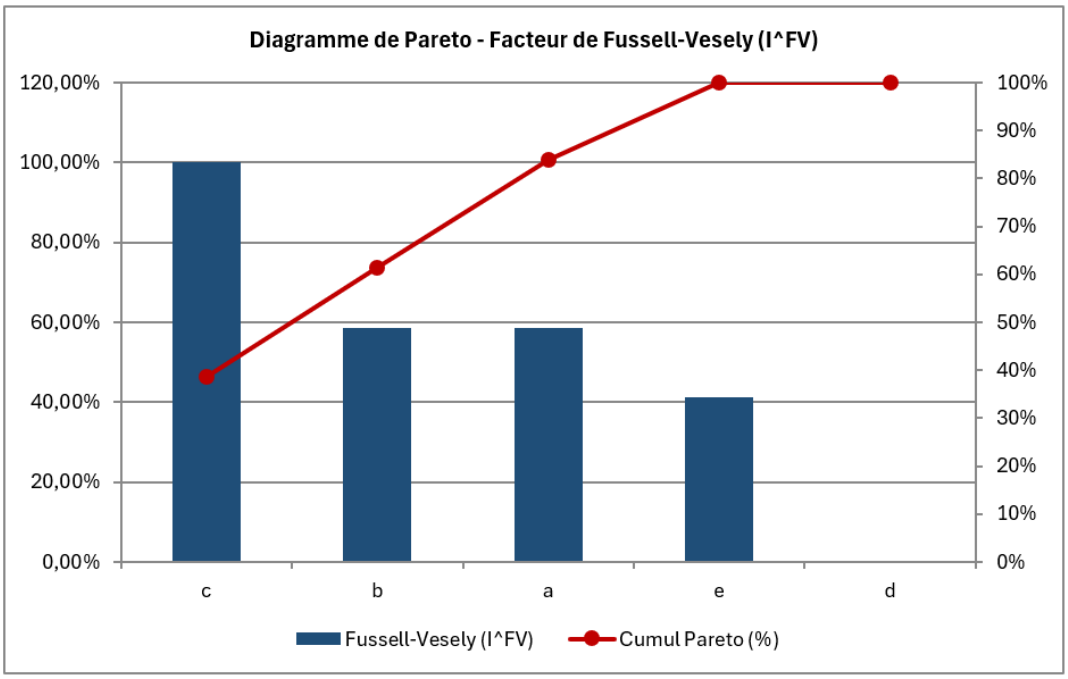
1. **Facteur de Birnbaum (I^B) :** Mesure la sensibilité structurelle pure du composant dans l'architecture, indépendamment de sa probabilité propre :

$$I^B(i) = Q_{\text{TOP}} \mid_{Q_i=1} - Q_{\text{TOP}} \mid_{Q_i=0}$$

2. **Facteur de Fussell-Vesely (I^{FV}) :** Mesure la contribution relative du composant à l'indisponibilité globale du système :

$$I^{FV}(i) = \frac{\sum_{k \in \text{MCS}_i} P\,(\text{MCS}_k)}{\sum_{\text{toutes MCS}} P\,(\text{MCS})}$$

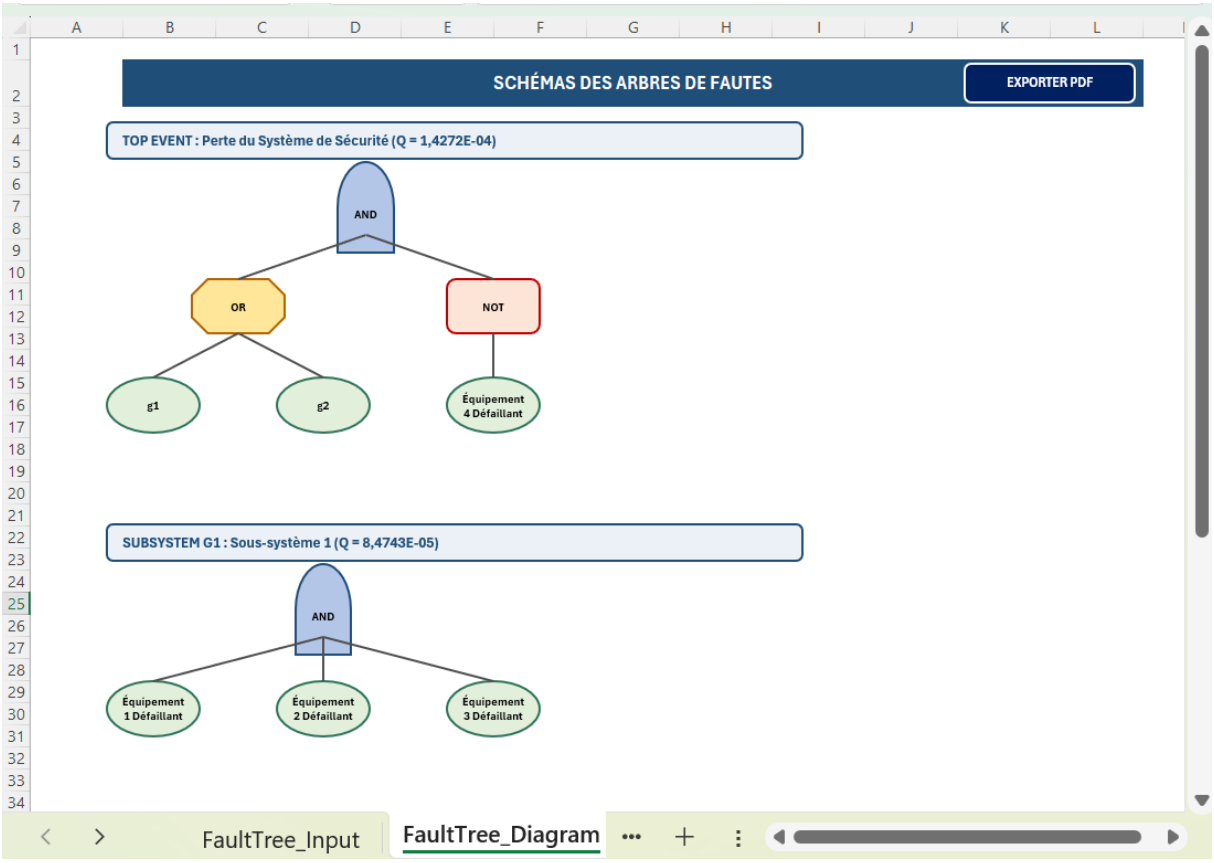
Un diagramme de Pareto combiné (histogramme de I^{FV} et courbe de cumul en %) met en évidence les composants prioritaires sur lesquels concentrer les efforts de fiabilité.



1.3. Rendu vectoriel de l'arbre (FaultTree_Diagram)

Le bouton **DESSINER** trace automatiquement l'arbre vectoriel :

- **Portes normalisées CEI 61025 :** ET (bleu), OU (jaune), OU Exclusif (saumon), NON (rouge clair), Vote k/n (orange).
- **Événements de base :** Ellipses/rectangles arrondis verts avec affichage sélectionnable entre identifiants courts (a, b) et désignations complètes.



5.4. Exportation automatisée Word & PDF

Le bouton **RAPPORT** compile et met en page automatiquement un document industriel d'assurance de la sécurité :

- Page de garde formelle et rappel des hypothèses.
- Synthèse du Top Event, inventaire des composants et probabilités unitaires.
- Tableaux complets des coupes minimales et facteurs d'importance.
- Vectorisation haute définition du diagramme de Pareto et de l'arbre complet.

Annexe technique : Exemple d'application aéronautique

Système de freinage d'urgence à l'atterrissage

On analyse la perte de décélération de secours d'un aéronef modélisée par l'équation :

$$\text{TOP} = (G_1 + G_2) \cdot\sim d$$

Avec :

- $G_1 = a \cdot b \cdot c$ *(Ligne hydraulique principale)*
- $G_2 = G_1 + 2(c, d, e)$ *(Ligne de secours avec logique de vote 2 sur 3)*

Données d'entrée :

ID	Désignation	Modèle	Paramètres de calcul	Probabilité Qi
a	Pompe hydraulique principale	Exponential	$\lambda = 1{,}0 \cdot 10^{-4}$ /h, $t = 1000$ h	$9{,}5163 \cdot 10^{-2}$
b	Servovalve de régulation	Weibull	$\beta = 1{,}5$, $\eta = 5000$ h, $t = 2000$ h, $\gamma = 0$	$2{,}2352 \cdot 10^{-1}$
c	Capteur de pression circuit	Exp_Repairable	$\lambda = 2{,}0 \cdot 10^{-4}$ /h, $\mu = 0{,}05$ /h	$3{,}9841 \cdot 10^{-3}$
d	Déploiement spoilers secours	Exp_Periodic	$\lambda = 1{,}0 \cdot 10^{-5}$ /h, $T_{\text{test}} = 720$ h	$3{,}6000 \cdot 10^{-3}$
e	Bus électrique commande	Constant	$Q = 0{,}015$	$1{,}5000 \cdot 10^{-2}$

Résultats de la résolution CABTREE :

- **Probabilité globale exacte du Top Event (Q_{TOP}) :** $1{,}4272 \cdot 10^{-4}$
- **Coupes minimales extraites :**
  1. MCS_1 (Ordre 3) : $c \cdot e \cdot\sim d \longrightarrow Q = 5{,}9546 \cdot 10^{-5}$
  2. MCS_2 (Ordre 4) : $a \cdot b \cdot c \cdot\sim d \longrightarrow Q = 8{,}4438 \cdot 10^{-5}$

- **Composant critique (Pareto) : Capteur de pression c ($I^{FV} = 100{,}0\,\%$)**, présent dans la totalité des coupes du système.

CONTRAT DE LICENCE D'UTILISATION DU PROGICIEL CABTREE

ARTICLE 1 : OBJET

Le présent contrat a pour objet de définir les conditions dans lesquelles la société **CAB INNOVATION** concède au client le droit d'utilisation personnel, non exclusif et incessible du progiciel dénommé **CABTREE**, dont les fonctionnalités sont détaillées dans le présent manuel d'utilisation.

ARTICLE 2 : ÉTENDUE DU DROIT D'UTILISATION

Le client est autorisé à faire fonctionner le progiciel sur un poste individuel de travail principal ainsi que sur un second poste d'appoint, sous réserve d'une utilisation strictement non simultanée. Une unique copie de sauvegarde peut être conservée en lieu sûr.

Dans le cadre d'une licence de site ou réseau, l'installation sur serveur est autorisée dans les limites strictes du nombre de postes et d'accès simultanés stipulés aux conditions particulières. CAB INNOVATION se réserve le droit de faire procéder, sous préavis raisonnable et sans perturber l'activité normale du client, à un contrôle de conformité des déploiements.

ARTICLE 3 : LIVRAISON, MISE À DISPOSITION ET RÉCEPTION

Le progiciel est mis à disposition du client sous forme électronique sécurisée (téléchargement ou transmission numérique) ou remis sur support physique. La date de livraison contractuelle correspond à la date de mise à disposition des clés d'accès ou à la réception effective des fournitures. L'installation est opérée par le client sous sa propre responsabilité. Toute contestation ou non-conformité apparente doit être notifiée par écrit à CAB INNOVATION dans un délai de trois (3) jours ouvrables.

ARTICLE 4 : GARANTIE DE FONCTIONNEMENT

CAB INNOVATION garantit la conformité logicielle du progiciel aux spécifications du manuel utilisateur pour une durée de trois (3) mois à compter de la date de livraison. Durant cette période, CAB INNOVATION s'engage à corriger toute anomalie reproductible et documentée ou à fournir une version corrective sans frais. La garantie ne couvre pas les anomalies consécutives à une mauvaise utilisation, à une modification non autorisée du code ou des macros, ou au non-respect des environnements préconisés.

ARTICLE 5 : PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

La concession de la présente licence n'opère aucun transfert de propriété. CAB INNOVATION conserve l'intégralité des droits patrimoniaux et moraux relatifs au progiciel CABTREE, aux codes sources, aux algorithmes et à la documentation. Le client s'interdit formellement toute rétro-ingénierie, décompilation, désassemblage ou transcription dans d'autres environnements techniques en dehors des dispositions impératives de la loi.

ARTICLE 6 : LIMITATION DE RESPONSABILITÉ
Le client demeure seul responsable du dimensionnement de ses modèles, du choix des paramètres de fiabilité appliqués et de l'interprétation des résultats d'ingénierie obtenus. CAB INNOVATION ne pourra en aucun cas être tenue responsable des préjudices indirects, pertes de chance, arrêts d'exploitation ou décisions d'ingénierie consécutives à l'utilisation du progiciel. En toute hypothèse, le plafond global d'indemnisation opposable à CAB INNOVATION est strictement limité au montant de la redevance initiale effectivement perçue au titre de la présente licence.

ARTICLE 7 : DURÉE ET RÉSILIATION
Le contrat est conclu pour une durée indéterminée. En cas de manquement grave par l'une des parties à ses obligations contractuelles non réparé sous quinze (15) jours suivant mise en demeure formelle, l'autre partie pourra prononcer la résiliation immédiate du droit d'utilisation. Le client s'engage alors à cesser l'usage du progiciel et à en détruire l'ensemble des copies.

ARTICLE 8 : CONFIDENTIALITÉ
Chacune des parties s'engage à préserver la stricte confidentialité des éléments techniques, financiers et organisationnels échangés lors de la commande et du cycle de vie du produit.

ARTICLE 9 : DROIT APPLICABLE ET ATTRIBUTION DE JURIDICTION
Le présent contrat est soumis au droit français. À défaut de résolution amiable, tout litige relatif à sa validité, son exécution ou son interprétation relève de la compétence exclusive des tribunaux du ressort de **TOULOUSE**, nonobstant pluralité de défendeurs ou appel en garantie.