Sommaire

I. Présentation du cadre
II. V(t) — Vulnérabilité systémique : définition, calcul et intégration dans IFH-TEC
III. IFH-TEC — V(t) : clarification et spécification opérationnelle consolidée
IV. IFH-TEC — Étude comparative de la vulnérabilité des réseaux Internet en Afrique de l'Est

# I. Présentation du cadre

Cadre général d’analyse fondé sur le Bien, la souffrance, les Conditions Favorables, l’Indice de Formation Harmonieux (IFH) et la Théorie de l’Expansion par la Condensation (TEC)

## Introduction

Ce cadre d’analyse propose une méthode unifiée pour étudier les phénomènes humains, sociaux, politiques, géopolitiques, économiques, culturels et technologiques.

Son objectif n’est pas d’abord de déterminer qui a raison ou qui a tort, ni de désigner des coupables ou des vainqueurs. Il cherche avant tout à comprendre dans quelle mesure une situation favorise ou entrave les conditions permettant une existence harmonieuse.

L’idée centrale est que tout système, qu’il s’agisse d’une personne, d’une société, d’une institution ou d’un ensemble de relations internationales, dépend de certaines conditions nécessaires à sa stabilité et à son développement. Lorsque ces conditions sont respectées, les structures peuvent se former, se maintenir et évoluer de manière relativement harmonieuse. Lorsqu’elles sont dégradées ou détruites, apparaissent alors différentes formes de souffrance, de fragmentation et de désorganisation.

Le cadre repose sur cinq piliers principaux :

• le Bien ;

• la souffrance ;

• les Conditions Favorables ;

• l’Indice de Formation Harmonieux (IFH) ;

• la Théorie de l’Expansion par la Condensation (TEC).

L’ensemble constitue un système cohérent permettant d’analyser aussi bien l’état présent d’une situation que sa trajectoire future.

## Le Bien

Dans ce cadre, le Bien désigne l’ensemble des conditions qui rendent possible une formation harmonieuse.

Le Bien n’est pas défini par une tradition particulière, une idéologie ou une appartenance politique. Il est défini par ses effets observables.

Relèvent du Bien tout ce qui tend à :

• protéger la vie ;

• favoriser la création ;

• renforcer la coopération ;

• accroître la stabilité ;

• développer la compréhension ;

• maintenir la cohésion ;

• réduire les souffrances évitables.

Le Bien agit comme un principe organisateur. Il correspond à tout ce qui augmente la capacité d’un système à se former, se maintenir et se développer sans dégradation inutile.

Une action est donc évaluée non selon son apparence ou son discours, mais selon son effet réel sur les conditions favorables à l’existence harmonieuse.

La souffrance

La souffrance désigne l’ensemble des phénomènes qui dégradent ou empêchent la formation harmonieuse.

Elle comprend :

• la douleur physique ;

• la douleur morale ;

• les menaces qui produisent ces douleurs ;

• les mécanismes qui les amplifient.

La souffrance n’est pas considérée ici comme un principe créateur.

Elle apparaît lorsque les conditions favorables nécessaires à la stabilité et au développement sont violées, affaiblies ou détournées.

Le cadre reconnaît cependant une distinction fondamentale.

Certaines souffrances peuvent s’imposer à un système :

• maladie ;

• catastrophe ;

• accident ;

• agression ;

• conflit ;

• contrainte naturelle.

Dans ces situations, il peut être nécessaire de composer avec une souffrance présente afin d’éviter une souffrance plus grande.

Cette distinction est essentielle.

Le cadre ne prétend pas qu’aucune souffrance n’existe.

Il affirme seulement qu’une souffrance n’acquiert jamais une valeur positive par sa simple existence.

La souffrance peut être tolérée lorsqu’elle accompagne une réduction globale de la souffrance, mais elle ne constitue jamais un objectif en elle-même.

Le principe de composition

L’un des fondements du modèle consiste à distinguer deux situations :

• produire une souffrance ;

• composer avec une souffrance qui s’impose.

Une opération chirurgicale, une rééducation, une mesure de protection ou une intervention d’urgence peuvent engendrer une souffrance immédiate tout en réduisant une souffrance plus importante à long terme.

Dans ces cas, la souffrance n’est pas recherchée.

Elle constitue une conséquence tolérée d’une action orientée vers un résultat globalement plus favorable.

Le cadre appelle cette logique le principe de composition.

Ce principe joue un rôle central dans l’analyse des conflits, des politiques publiques, des décisions institutionnelles et des choix collectifs.

Conditions Favorables et Conditions Défavorables

Les Conditions Favorables représentent les paramètres qui permettent à une structure de se développer harmonieusement.

Elles peuvent prendre des formes différentes selon le domaine étudié.

Dans une société, elles incluent notamment :

• la sécurité ;

• la confiance ;

• la stabilité ;

• la justice ;

• la coopération ;

• l’accès à l’information ;

• la protection des populations ;

• la possibilité de dialogue.

Dans l’économie :

• accès aux ressources ;

• stabilité matérielle ;

• prévisibilité ;

• résilience.

Dans les relations internationales :

• diplomatie ;

• coopération ;

• mécanismes de confiance ;

• protection des civils ;

• limitation des conflits.

Plus les Conditions Favorables augmentent, plus les systèmes tendent à produire de l’harmonie.

À l’inverse, les Conditions Défavorables regroupent les facteurs qui empêchent ou dégradent la formation harmonieuse :

• guerre ;

• corruption ;

• désinformation ;

• fragmentation ;

• pauvreté extrême ;

• exclusion ;

• polarisation excessive ;

• effondrement institutionnel.

Ces facteurs augmentent généralement la souffrance et réduisent la stabilité globale du système.

La logique du pivot

La logique du pivot constitue l’un des éléments les plus originaux du cadre.

Un pivot est un élément capable de modifier la trajectoire globale d’un système.

Il peut s’agir :

• d’une décision ;

• d’une réforme ;

• d’une innovation ;

• d’une institution ;

• d’un changement culturel ;

• d’une médiation ;

• d’un événement historique.

Le pivot n’est jamais évalué uniquement selon son apparence immédiate.

Il est évalué selon ses conséquences nettes sur les Conditions Favorables et sur l’Harmonie globale.

Ainsi :

une mesure difficile peut devenir un pivot favorable si elle évite une souffrance plus grande ;

tandis qu’une mesure populaire peut devenir un pivot défavorable si elle augmente la fragmentation ou la souffrance.

Cette logique permet de dépasser les oppositions superficielles pour examiner les effets réels des événements.

Cadre général d’analyse fondé sur le Bien, la souffrance, les Conditions Favorables, l’Indice de Formation Harmonieux (IFH) et la Théorie de l’Expansion par la Condensation (TEC)

L’Indice de Formation Harmonieux (IFH)

Afin de disposer d’un outil permettant d’évaluer concrètement le degré d’organisation d’un système, le cadre introduit l’Indice de Formation Harmonieux (IFH).

L’IFH mesure la capacité d’un système à maintenir des structures stables, cohérentes et favorables à une existence harmonieuse.

L’idée fondamentale est qu’une société, une institution, un organisme vivant ou un ensemble géopolitique ne peut fonctionner durablement que si plusieurs dimensions essentielles demeurent suffisamment organisées.

L’IFH cherche donc à quantifier le niveau de formation harmonieuse d’un système à travers plusieurs dimensions complémentaires.

Le modèle distingue quatre composantes principales.

IFH_cosmos

L’IFH_cosmos mesure la stabilité générale de l’environnement dans lequel évolue le système étudié.

Selon le contexte, il peut concerner :

• la stabilité géopolitique ;

• la stabilité environnementale ;

• la résilience des infrastructures ;

• la prévisibilité du système global ;

• l’équilibre entre les différents acteurs.

Lorsque les guerres, les crises majeures ou les catastrophes se multiplient, l’IFH_cosmos tend à diminuer.

Lorsque la coopération, la stabilité et la prévisibilité augmentent, l’IFH_cosmos tend à s’élever.

IFH_biologie

L’IFH_biologie mesure le degré de protection de la vie.

Il prend notamment en compte :

• la santé ;

• la sécurité physique ;

• l’accès aux soins ;

• la nutrition ;

• la protection des populations ;

• la réduction des pertes humaines.

Toute situation qui menace directement la vie tend à faire baisser cet indice.

À l’inverse, les politiques de santé, les systèmes de protection et les progrès médicaux tendent à l’augmenter.

IFH_social

L’IFH_social mesure le niveau de cohésion collective.

Il inclut :

• la confiance entre les individus ;

• la stabilité des institutions ;

• la qualité de la coopération ;

• le respect des règles communes ;

• la capacité d’action collective.

Les phénomènes de fragmentation, de polarisation ou de défiance institutionnelle contribuent généralement à diminuer cet indice.

Les mécanismes favorisant la coopération et la cohésion le renforcent.

IFH_conscience

L’IFH_conscience mesure la qualité du discernement collectif.

Il concerne notamment :

• la capacité de dialogue ;

• l’accès à une information fiable ;

• la compréhension mutuelle ;

• la réflexion critique ;

• la lucidité face aux problèmes.

Cet indice devient particulièrement important dans les sociétés modernes où l’information joue un rôle majeur dans la formation des décisions collectives.

La désinformation, la manipulation ou la déshumanisation tendent à le réduire.

Le dialogue, l’éducation et la compréhension mutuelle tendent à l’augmenter.

Évaluation des IFH

Chaque composante de l’IFH est représentée par une valeur comprise entre 0 et 1.

De manière simplifiée :

• 0 correspond à une désorganisation extrême ;

• 1 correspond à une organisation harmonieuse maximale.

Ces valeurs n’ont pas vocation à produire une précision absolue.

Elles servent principalement à comparer des situations, à identifier les zones de fragilité et à suivre l’évolution d’un système dans le temps.

L’objectif n’est pas de prétendre mesurer parfaitement la réalité.

L’objectif est de disposer d’une grille cohérente permettant d’analyser les tendances.

Formalisation de l’Harmonie

Une fois les Conditions Favorables et les différents IFH évalués, le cadre introduit une mesure synthétique appelée Harmonie.

La relation utilisée est :

Cette formule exprime une idée simple.

Même lorsqu’un système possède plusieurs dimensions relativement solides, une forte dégradation des Conditions Favorables limite sa capacité globale à fonctionner harmonieusement.

Inversement, lorsque les Conditions Favorables sont élevées, les différentes dimensions de l’IFH peuvent pleinement contribuer à la stabilité du système.

L’Harmonie représente donc une mesure synthétique de la capacité du système à maintenir une existence organisée et stable.

Formalisation de la souffrance

Le cadre introduit ensuite une mesure complémentaire appelée Souffrance.

Après normalisation de l’Harmonie sur sa valeur maximale théorique, la souffrance est définie comme :

Cette relation traduit une hypothèse fondamentale du modèle :

la souffrance augmente lorsque les conditions favorables diminuent et lorsque les structures harmonieuses se dégradent.

Ainsi :

• Harmonie élevée → souffrance faible ;

• Harmonie faible → souffrance élevée.

La souffrance n’est donc pas considérée comme une force indépendante entrant dans le système.

Elle apparaît comme un indicateur du degré de dégradation des conditions permettant la formation harmonieuse.

Interprétation du modèle

Il est important de comprendre que ces équations ne prétendent pas constituer une loi physique universelle comparable aux lois de la mécanique ou de la thermodynamique.

Elles jouent un rôle de modélisation.

Elles permettent :

• d’organiser l’analyse ;

• de comparer différentes situations ;

• d’identifier des facteurs favorables ou défavorables ;

• d’étudier les conséquences possibles de certaines décisions.

Le modèle fonctionne donc comme une grille de lecture systémique.

Il cherche à rendre visibles des relations souvent dispersées entre stabilité, coopération, confiance, protection de la vie et souffrance collective.

Pourquoi utiliser une mesure harmonique ?

Les analyses classiques se concentrent souvent sur :

• les rapports de force ;

• les intérêts ;

• les idéologies ;

• les responsabilités.

Ces approches sont utiles mais laissent parfois de côté une question plus fondamentale :

quelles sont les conséquences globales d’un événement sur la capacité du système à maintenir une existence harmonieuse ?

Le cadre proposé cherche précisément à répondre à cette question.

Il ne demande pas uniquement :

« Qui gagne ? »

ou :

« Qui a raison ? »

Il demande également :

« Les conditions favorables à la formation harmonieuse augmentent-elles ou diminuent-elles ? »

Cette différence de perspective constitue le cœur du modèle.

Vers une lecture dynamique

Jusqu’ici, le cadre a principalement étudié les systèmes comme des photographies instantanées.

Le Mode 1 fournit donc un diagnostic structurel :

• état actuel des Conditions Favorables ;

• niveau des différents IFH ;

• niveau global d’Harmonie ;

• niveau global de Souffrance ;

• identification des pivots favorables ou défavorables.

Mais un système ne reste jamais immobile.

Les sociétés évoluent.

Les conflits évoluent.

Les institutions évoluent.

Les individus évoluent.

Pour comprendre ces trajectoires, il devient nécessaire d’ajouter une dimension temporelle.

C’est précisément le rôle de la Théorie de l’Expansion par la Condensation (TEC), qui constitue le fondement du Mode 2 d’analyse dynamique.

Cadre général d’analyse fondé sur le Bien, la souffrance, les Conditions Favorables, l’Indice de Formation Harmonieux (IFH) et la Théorie de l’Expansion par la Condensation (TEC)

Justice, neutralisation et escalade

L’une des distinctions les plus importantes du cadre concerne la différence entre la neutralisation défensive et l’escalade punitive.

Cette distinction vise à éviter une confusion fréquente dans l’analyse des conflits : toute utilisation de la force n’a pas nécessairement la même signification ni les mêmes conséquences structurelles.

Le cadre considère qu’il existe une différence fondamentale entre :

• empêcher une souffrance plus grande ;

• produire une souffrance en retour.

Cette différence constitue le cœur de la distinction entre justice et vengeance.

La neutralisation défensive

La neutralisation défensive désigne toute action dont l’objectif principal consiste à empêcher une souffrance plus grande.

Ses finalités peuvent être :

• protéger des populations ;

• empêcher une agression ;

• limiter une menace ;

• mettre hors d’état de nuire un acteur dangereux ;

• préserver des conditions favorables à la stabilité.

Dans ce cadre, la neutralisation n’a pas pour objectif de faire souffrir.

La souffrance éventuellement produite n’est pas recherchée pour elle-même.

Elle apparaît comme une conséquence tolérée d’une action visant à réduire une souffrance globale plus importante.

Cette logique correspond au principe de composition introduit précédemment.

La neutralisation est représentée par :

Pn = puissance de neutralisation défensive

Plus Pn augmente, plus un système développe sa capacité à protéger les structures harmonieuses contre les facteurs de désorganisation.

L’escalade punitive

L’escalade punitive repose sur une logique différente.

Son objectif principal n’est plus d’empêcher une souffrance plus grande.

Son objectif devient de répondre à une souffrance par une nouvelle souffrance.

Elle peut prendre diverses formes :

• représailles ;

• vengeance ;

• humiliation ;

• démonstration de force ;

• punition pour elle-même ;

• logique de domination.

Le cadre considère que cette dynamique tend généralement à alimenter la fragmentation.

Elle produit souvent des boucles auto-renforçantes :

souffrance → réaction punitive → nouvelle souffrance → nouvelle réaction punitive.

Cette dynamique est représentée par :

Pe = puissance d’escalade punitive

Plus Pe augmente, plus les risques de fragmentation et de désorganisation augmentent.

La justice

La justice occupe une position particulière.

Dans ce cadre, elle n’est ni une absence d’action ni une vengeance.

La justice vise à empêcher de nuire.

Elle agit comme une forme de neutralisation légitime.

Son objectif n’est pas :

• de faire souffrir ;

• d’humilier ;

• de se venger.

Son objectif est :

• protéger ;

• réparer ;

• prévenir ;

• maintenir les conditions favorables à la coexistence.

La justice constitue donc un mécanisme de stabilisation.

Elle cherche à limiter la souffrance future plutôt qu’à reproduire la souffrance passée.

La Théorie de l’Expansion par la Condensation (TEC)

Le Mode 1 permet d’évaluer l’état d’un système.

Mais un système peut être stable aujourd’hui et devenir instable demain.

Pour comprendre cette évolution, le cadre introduit la Théorie de l’Expansion par la Condensation (TEC).

La TEC constitue la dimension dynamique du modèle.

Elle décrit la manière dont les systèmes évoluent dans le temps.

Son hypothèse centrale est que les structures suivent généralement des cycles caractérisés par des phases de formation, de dispersion, de crise et de réorganisation.

Les quatre phases fondamentales

1. Condensation

La condensation correspond à une phase de formation harmonieuse.

Elle se caractérise par :

• coopération ;

• confiance ;

• stabilité ;

• cohésion ;

• prévisibilité ;

• capacité de dialogue.

Dans une société, cela peut correspondre à :

• des institutions fonctionnelles ;

• une confiance suffisante ;

• une faible fragmentation ;

• une coopération élevée.

Dans les relations internationales, cela peut correspondre à :

• des accords ;

• des mécanismes de confiance ;

• une diplomatie active ;

• une stabilité géopolitique relative.

La condensation favorise généralement l’augmentation des différents IFH.

2. Expansion

L’expansion correspond à une phase de dispersion.

Elle se manifeste par :

• polarisation ;

• fragmentation ;

• conflits ;

• perte de confiance ;

• tensions croissantes.

L’expansion ne signifie pas nécessairement un effondrement immédiat.

Elle désigne une dynamique où les mécanismes de cohésion deviennent progressivement moins efficaces.

Lorsque l’expansion domine durablement, les IFH tendent à diminuer.

3. Vide critique

Le vide critique correspond à un seuil.

À ce stade :

• les mécanismes stabilisateurs ne fonctionnent plus correctement ;

• la confiance devient insuffisante ;

• la coopération devient extrêmement difficile ;

• les structures peinent à maintenir leur cohérence.

Le vide critique représente donc une zone de vulnérabilité maximale.

Le système n’est pas encore nécessairement détruit.

Mais sa capacité de formation harmonieuse devient très faible.

4. Implosion

L’implosion correspond à une réorganisation brutale.

Lorsque les tensions accumulées deviennent trop importantes, le système est

contraint de se restructurer.

Cette restructuration peut prendre des formes très différentes :

• crise institutionnelle majeure ;

• révolution ;

• guerre élargie ;

• effondrement organisationnel ;

• recomposition profonde des équilibres.

L’implosion n’est pas forcément la fin du système.

Elle constitue souvent la transition vers une nouvelle phase de condensation.

Les variables dynamiques

Pour étudier ces trajectoires, le cadre utilise plusieurs variables principales.

Pn(t)

Puissance de neutralisation défensive.

Elle représente la capacité du système à :

• protéger ;

• stabiliser ;

• empêcher les dégradations.

Pe(t)

Puissance d’escalade punitive.

Elle représente les mécanismes qui amplifient les tensions :

• représailles ;

• vengeance ;

• démonstrations de force ;

• humiliations.

D(t)

Diplomatie ou capacité effective de dialogue.

Cette variable mesure :

• la négociation ;

• la médiation ;

• les mécanismes de désescalade ;

• les espaces de coopération.

F(t)

Fragmentation.

Elle représente :

• les divisions ;

• la polarisation ;

• la perte de cohésion ;

• la dispersion des acteurs.

C(t)

Confiance minimale.

Il ne s’agit pas d’une confiance totale.

Il s’agit simplement du niveau minimal permettant :

• le dialogue ;

• les engagements ;

• les accords ;

• les mécanismes de vérification.

Le diagnostic dynamique

Le diagnostic dynamique repose sur l’équilibre entre ces variables.

Une règle simplifiée du modèle est :

Si :

Pe > D

alors le système tend vers l’expansion.

Si :

D > Pe

alors le système tend vers la condensation.

Cette règle ne prétend pas décrire toute la complexité du réel.

Elle exprime simplement une idée fondamentale :

une société où l’escalade domine durablement le dialogue tend à se fragmenter ;

une société où le dialogue domine durablement l’escalade tend à se stabiliser.

La confiance agit alors comme un multiplicateur de stabilité.

La fragmentation agit comme un multiplicateur d’instabilité.

Articulation entre Mode 1 et Mode 2

Le cadre comporte donc deux niveaux complémentaires.

Mode 1 : analyse harmonique

Le Mode 1 répond à la question :

Quel est l’état actuel du système ?

Il mesure :

• les Conditions Favorables ;

• les différents IFH ;

• l’Harmonie ;

• la Souffrance.

Il fournit une photographie structurelle.

Mode 2 : analyse dynamique

Le Mode 2 répond à la question :

Vers où le système évolue-t-il ?

Il mesure :

• les dynamiques de fragmentation ;

• les mécanismes de stabilisation ;

• les risques de crise ;

• les possibilités de recondensation.

Il fournit une analyse de trajectoire.

Le Mode 1 décrit la position.

Le Mode 2 décrit le mouvement.

L’un sans l’autre reste incomplet.

Un système peut présenter une souffrance élevée tout en s’améliorant.

Inversement, un système relativement stable peut évoluer rapidement vers davantage de fragmentation.

C’est pourquoi les deux approches doivent être utilisées conjointement.

La question centrale du cadre

Au terme de cette construction théorique, le cadre transforme profondément la manière d’aborder les phénomènes humains.

Au lieu de demander uniquement :

« Qui a raison ? »

ou :

« Qui va gagner ? »

il introduit une interrogation différente :

« Les conditions favorables à la formation harmonieuse augmentent-elles ou diminuent-elles ? »

Et plus profondément encore :

« Le système évolue-t-il vers davantage de condensation harmonieuse ou vers davantage d’expansion et de souffrance ? »

Cette question constitue le cœur du modèle.

## Conclusion générale : une méthode d’analyse orientée vers l’harmonie

Le cadre d’analyse fondé sur le Bien, la souffrance, les Conditions Favorables, l’Indice de Formation Harmonieux (IFH) et la Théorie de l’Expansion par la Condensation (TEC) constitue une tentative de lecture unifiée des phénomènes humains et collectifs.

Son ambition n’est pas de remplacer les approches scientifiques, historiques, économiques ou géopolitiques existantes.

Il cherche plutôt à proposer une grille de lecture transversale permettant d’examiner des phénomènes très différents à partir d’une question commune :

Dans quelle mesure les conditions permettant une existence harmonieuse sont-elles renforcées ou affaiblies ?

Cette question peut être appliquée à tous les niveaux d’analyse :

• à l’échelle d’un individu ;

• à l’échelle d’une famille ;

• à l’échelle d’une institution ;

• à l’échelle d’une société ;

• à l’échelle d’un conflit ;

• à l’échelle d’une civilisation ;

• voire à l’échelle du système mondial.

Le modèle repose sur l’idée que toute formation durable nécessite certaines conditions minimales de stabilité, de coopération et de protection.

Lorsqu’elles sont présentes, les systèmes tendent à se structurer, à se développer et à maintenir leur cohérence.

Lorsqu’elles disparaissent, les phénomènes de fragmentation, de désorganisation et de souffrance augmentent.

Le concept de Conditions Favorables permet ainsi de dépasser les oppositions idéologiques traditionnelles.

Une politique, une institution, une innovation ou une décision n’est pas évaluée d’abord selon son étiquette ou selon le camp auquel elle appartient.

Elle est évaluée selon son effet réel sur les conditions permettant :

• la protection de la vie ;

• la stabilité ;

• la coopération ;

• la confiance ;

• la compréhension ;

• la réduction des souffrances évitables.

L’Indice de Formation Harmonieux complète cette approche en permettant d’observer comment ces conditions se traduisent concrètement dans différentes dimensions du réel.

L’IFH_cosmos mesure la stabilité du système global.

L’IFH_biologie mesure la protection de la vie.

L’IFH_social mesure la cohésion collective.

L’IFH_conscience mesure la capacité de discernement et de dialogue.

En les combinant avec les Conditions Favorables, le modèle cherche à produire une représentation synthétique de l’état harmonique d’un système.

Cette démarche conduit naturellement à une redéfinition du rôle de la souffrance.

Dans ce cadre, la souffrance n’est pas interprétée comme une force créatrice.

Elle apparaît comme le signe d’une dégradation des conditions permettant la formation harmonieuse.

Plus les conditions favorables diminuent, plus la souffrance tend à augmenter.

Inversement, plus les conditions favorables sont restaurées, plus la souffrance tend à diminuer.

Cette perspective conduit également à distinguer deux logiques souvent confondues :

• la neutralisation défensive ;

• l’escalade punitive.

Le cadre considère qu’une action destinée à empêcher une souffrance plus grande peut être compatible avec une logique de protection, même lorsqu’elle implique certaines contraintes.

En revanche, les logiques de vengeance, d’humiliation ou de punition pour elles-mêmes tendent généralement à alimenter les mécanismes de fragmentation.

Cette distinction permet d’aborder les questions de justice, de sécurité et de conflit sous un angle différent de celui des simples rapports de force.

La justice n’est plus conçue comme une reproduction de la souffrance.

Elle devient un mécanisme visant à empêcher de nuire tout en préservant autant que possible les conditions de coexistence.

La Théorie de l’Expansion par la Condensation ajoute ensuite une dimension dynamique à l’ensemble.

Les systèmes ne sont jamais figés.

Ils évoluent continuellement entre des phases de condensation et d’expansion.

La condensation correspond à l’augmentation de la stabilité, de la confiance et de la coopération.

L’expansion correspond à l’augmentation de la fragmentation, de la polarisation et de la dispersion.

Lorsque les mécanismes stabilisateurs deviennent insuffisants, le système peut approcher un vide critique où sa capacité de cohésion est fortement réduite.

Si les tensions continuent de s’accumuler, une phase d’implosion peut alors conduire à une réorganisation profonde des structures existantes.

Cette lecture dynamique permet de dépasser la simple photographie d’une situation.

Elle invite à étudier les trajectoires.

Un système fortement dégradé peut se rétablir si les forces de condensation reprennent le dessus.

Inversement, un système relativement stable peut entrer dans une dynamique de dégradation progressive si les mécanismes de fragmentation deviennent dominants.

Le cadre introduit ainsi une double exigence :

comprendre l’état actuel des choses,

et comprendre leur direction d’évolution.

La logique du pivot joue ici un rôle essentiel.

Un pivot est un élément capable de modifier significativement la trajectoire d’un système.

Il peut s’agir :

• d’une réforme ;

• d’une décision ;

• d’une innovation ;

• d’une institution ;

• d’une médiation ;

• d’un changement culturel ;

• ou d’une évolution technologique.

Le pivot n’est jamais évalué selon son apparence immédiate.

Il est évalué selon sa capacité réelle à augmenter ou diminuer les conditions favorables et l’harmonie globale.

Cette approche permet d’éviter de réduire l’analyse à des oppositions binaires.

Elle conduit à examiner les conséquences concrètes des actions plutôt que leurs seules intentions déclarées.

Appliqué à l’actualité contemporaine, ce cadre conduit à identifier plusieurs forces de condensation harmonieuse :

• la culture ;

• la science ;

• la coopération ;

• la diplomatie ;

• la protection civile ;

• la justice proportionnée ;

• les solidarités locales ;

• l’éducation ;

• la création de connaissances.

Il permet également d’identifier plusieurs forces de fragmentation :

• les conflits armés ;

• les logiques de vengeance ;

• la polarisation excessive ;

• la désinformation ;

• la perte de confiance ;

• les mécanismes d’humiliation ;

• certaines formes de manipulation technologique ou informationnelle.

L’objectif ultime du modèle n’est donc pas la simple description du monde.

Il cherche à orienter l’analyse vers la recherche de solutions.

Chaque situation contient généralement :

• des facteurs de condensation ;

• des facteurs d’expansion.

Le rôle de l’analyse consiste alors à identifier les pivots capables de renforcer les premiers et de limiter les seconds.

Dans cette perspective, la question fondamentale n’est plus seulement :

« Qui a raison ? »

ni :

« Qui va gagner ? »

mais plutôt :

« Quelles transformations permettent d’augmenter durablement les Conditions Favorables, de renforcer les IFH et de réduire la souffrance évitable ? »

Et, dans le langage de la Théorie de l’Expansion par la Condensation :

« Le système évolue-t-il vers davantage de condensation harmonieuse ou vers

davantage d’expansion et de fragmentation ? »

Cette interrogation constitue le principe directeur du cadre tout entier.

Elle en résume à la fois la méthode, l’objectif et la finalité.

## II. V(t) — Vulnérabilité systémique : définition, calcul et intégration dans IFH-TEC

### V(t) — Vulnérabilité systémique : définition, calcul et intégration dans IFH-TEC

Introduction

Dans le cadre IFH-TEC, l'analyse d'une crise ne doit pas seulement mesurer les dommages déjà produits. Elle doit également permettre d'estimer la capacité d'un système à subir, transmettre ou absorber une perturbation.

C'est pour cette raison que la variable V(t) a été introduite dans le Cycle 2.

V(t) désigne la vulnérabilité systémique à l'instant t.

Elle ne représente pas directement la Souffrance.

La distinction est importante :

La Souffrance mesure l'état défavorable effectivement produit.
V(t) mesure la vulnérabilité du système face à une perturbation susceptible de produire ou d'aggraver cette Souffrance.
Un système peut donc présenter une vulnérabilité élevée sans connaître immédiatement une Souffrance maximale.

Inversement, une perturbation importante peut produire une forte Souffrance même lorsque la vulnérabilité préalable était plus faible.

1. Pourquoi introduire V(t) ?

Le Cycle 1 a montré qu'une perturbation d'un pivot critique ne produit pas nécessairement un effet proportionnel à son intensité.

Une infrastructure, une route maritime, une source énergétique ou une chaîne logistique peut être fortement perturbée tandis que le système continue à fonctionner grâce à :

des routes alternatives ;
des stocks ;

des fournisseurs différents ;
des infrastructures de substitution ;
des transferts logistiques ;
des mécanismes de protection ;
des capacités diplomatiques ;
des adaptations techniques ou économiques.
Il faut donc distinguer deux dimensions :

La perturbation elle-même.
La capacité du système à résister à cette perturbation et à en absorber les conséquences.
V(t) sert à représenter cette seconde dimension.

2. V(t) n'est pas la Souffrance
La Souffrance appartient directement au diagnostic IFH-TEC.

Elle correspond à la dégradation des conditions permettant la formation harmonieuse.

On peut donc observer une relation de ce type :

Harmonie en baisse -> Souffrance en hausse.

Cela ne signifie pas que V(t) est égale au niveau de Souffrance ni que les deux variables évoluent nécessairement au même rythme.

V(t) répond à une autre question :

Si une perturbation survient ou se poursuit, dans quelle mesure le système est-il exposé, dépendant de points critiques et capable d'absorber les conséquences ?

La chaîne causale envisagée devient :

Perturbation et vulnérabilité -> Transmission de la perturbation -> Conditions défavorables -> IFH en baisse -> Harmonie en baisse -> Souffrance en hausse.

Cette chaîne est une représentation simplifiée. Les mécanismes d'adaptation, de protection, de neutralisation et de substitution peuvent réduire les conséquences à différentes étapes.

Une augmentation de V(t) ne provoque donc pas automatiquement une augmentation de la Souffrance. Elle peut augmenter le risque qu'une perturbation produise des effets défavorables.

3. Les deux niveaux de vulnérabilité
Le calcul distingue deux dimensions :

La vulnérabilité structurelle, avant prise en compte de la capacité d'adaptation effective.
La vulnérabilité systémique résultante, après prise en compte de cette capacité.
3.1. La vulnérabilité structurelle
La vulnérabilité structurelle dépend de trois composantes.

D_dep(t) : dépendance critique

Cette variable mesure le degré de dépendance du système à l'égard d'un pivot, d'une infrastructure, d'une ressource ou d'un acteur difficilement remplaçable.

E(t) : exposition

Cette variable mesure le degré auquel le système est exposé aux perturbations susceptibles d'affecter les éléments critiques dont il dépend.

K(t) : concentration et insuffisance de redondance

Cette variable mesure la concentration des fonctions critiques et l'insuffisance des solutions de remplacement. Une valeur élevée correspond à une concentration importante et à une redondance insuffisante.

Chaque composante est normalisée entre 0 et 1.

La vulnérabilité structurelle est définie par la formule suivante :

$$Vs(t) = [D_{dep}(t) + E(t) + K(t)] / 3$$

Plus Vs(t) est élevée, plus le système dépend de pivots critiques exposés et difficilement remplaçables.

Cette moyenne constitue une convention de modélisation. Elle suppose que les trois composantes ont le même poids. Cette hypothèse devra être justifiée et testée.

3.2. Pourquoi utiliser D_dep(t) plutôt que D(t) ?
Dans la notation initiale, D(t) pouvait désigner deux variables différentes :

La dépendance critique dans le calcul de la vulnérabilité.
La dynamique diplomatique dans le modèle TEC.
Cette réutilisation d'un même symbole créait une ambiguïté et risquait de provoquer des erreurs d'interprétation ou de calcul.

La notation est désormais explicitement séparée :

D_dep(t) désigne exclusivement la dépendance critique.
D_dip(t) désigne exclusivement la dynamique diplomatique.
Vs(t) désigne la vulnérabilité structurelle.
A_eff(t) désigne la capacité d'adaptation effective.
V(t) désigne la vulnérabilité systémique résultante.
La diplomatie ne figure donc pas directement dans la formule de la vulnérabilité structurelle. Elle peut néanmoins influencer indirectement la vulnérabilité si elle permet d'améliorer l'adaptation, la protection, la coopération ou la neutralisation des perturbations.

4. La capacité d'adaptation effective
La vulnérabilité structurelle ne suffit pas à décrire le comportement réel d'un système.

Un système peut être fortement dépendant d'un pivot tout en disposant de capacités d'adaptation importantes.

On introduit donc A_eff(t), qui représente la capacité d'adaptation effective du système à l'instant t.

Elle tient notamment compte :

de la possibilité de substituer une ressource ou une infrastructure ;
de la redondance disponible ;
des stocks mobilisables ;
des routes alternatives ;
des capacités techniques ;
de la coopération entre acteurs ;
des mécanismes de protection ;
de la rapidité de mise en oeuvre des solutions ;
de la durée pendant laquelle ces solutions peuvent rester opérationnelles ;
des coûts et des risques associés à l'adaptation.
L'adaptation ne doit pas être considérée comme parfaite simplement parce qu'une fonction est momentanément maintenue.

Une solution alternative peut être :

coûteuse ;
temporaire ;
fragile ;
de capacité inférieure ;
dépendante de réserves exceptionnelles ;
elle-même exposée à des perturbations ;
difficile à maintenir dans la durée.
A_eff(t) représente donc la capacité d'adaptation effective, et non la simple présence théorique d'une solution de remplacement.

Cette variable est normalisée entre 0 et 1 :

0 signifie qu'aucune capacité d'adaptation effective n'est reconnue selon les critères retenus.
1 signifie que la capacité d'adaptation effective est considérée comme maximale selon ces mêmes critères.
Ces bornes constituent une convention de mesure. Elles ne signifient pas qu'une adaptation réelle peut toujours être absolument parfaite.

5. Formule candidate de V(t)
La vulnérabilité systémique résultante est calculée provisoirement selon la formule suivante :

$$V(t) = Vs(t) \times [1 - A_{eff}(t)]$$

En remplaçant Vs(t) par sa définition, on obtient :

$$V(t) = \{[D_{dep}(t) + E(t) + K(t)] / 3\} \times [1 - A_{eff}(t)]$$

Toutes les composantes sont comprises entre 0 et 1.

Le résultat respecte donc la borne suivante :

$$0 \leq V(t) \leq 1$$

Selon cette convention :

Une valeur de V(t) proche de 0 indique une vulnérabilité résultante faible.
Une valeur de V(t) proche de 1 indique une vulnérabilité résultante élevée.
Cette formule suppose que l'adaptation réduit la vulnérabilité structurelle de manière multiplicative. C'est une hypothèse de travail, et non une loi démontrée.

Elle ne prend pas encore explicitement en compte toutes les interactions possibles entre les composantes, les effets de seuil, les dépendances communes ni les changements de vulnérabilité provoqués par l'adaptation elle-même.

Ces limites devront être examinées lors des tests.

6. Exemple numérique
Supposons qu'un système présente les valeurs suivantes :

$$D_{dep} = 0,90$$

$$E = 0,90$$

$$K = 0,90$$

La vulnérabilité structurelle est alors :

$$Vs = (0,90 + 0,90 + 0,90) / 3$$

Vs = 0,90

Scénario A : capacité d'adaptation limitée
Supposons :

A_eff = 0,20

Alors :

V = 0,90 x (1 - 0,20)

V = 0,90 x 0,80

V = 0,72

Le système présente une vulnérabilité résultante élevée malgré certaines capacités d'adaptation.

Scénario B : capacité d'adaptation robuste
Imaginons maintenant que les solutions de substitution soient plus accessibles, plus fiables et plus durables.

A_eff = 0,80

Alors :

V = 0,90 x (1 - 0,80)

V = 0,90 x 0,20

V = 0,18

La dépendance structurelle demeure identique, mais la capacité d'adaptation effective réduit fortement la vulnérabilité résultante selon la formule proposée.

Cet exemple illustre le fonctionnement mathématique du modèle. Il ne démontre pas, à lui seul, que les valeurs choisies correspondent à une situation réelle ni que la formule prédit correctement ses conséquences.

7. Pourquoi l'adaptation ne signifie pas la disparition de la vulnérabilité
C'est un point central du Cycle 2.

Une adaptation peut maintenir une fonction sans supprimer la fragilité du système.

Prenons l'exemple d'une route maritime principale perturbée.

Le système peut recourir à une route secondaire :

Route principale perturbée.

Puis :

Route secondaire mobilisée.

Puis :

Fonction logistique maintenue.

Mais cette adaptation peut entraîner :

des coûts de transport supérieurs ;
une capacité logistique réduite ;

des délais plus longs ;
une consommation accélérée des stocks ;
une exposition accrue à d'autres risques ;
une dépendance à une solution exceptionnelle ;
une moindre capacité à absorber une nouvelle perturbation.
La fonction est donc maintenue, mais la vulnérabilité n'est pas nécessairement supprimée.

La distinction fondamentale est la suivante :

Maintien de la fonction ne signifie pas disparition de la vulnérabilité.

La mesure de A_eff(t) doit donc porter sur la capacité réelle et durable d'absorption, et non sur la seule constatation que le système continue momentanément à fonctionner.

Il faut également éviter un raisonnement circulaire : la capacité d'adaptation ne doit pas être considérée comme élevée uniquement parce que les conséquences observées sont faibles. Elle doit être estimée à partir de critères indépendants, puis confrontée aux résultats observés.

8. Relation avec la Souffrance et les variables IFH-TEC
V(t) et la Souffrance sont deux variables distinctes.

On peut représenter leur relation hypothétique ainsi :

Perturbation.

Puis :

Vulnérabilité systémique V(t).

Puis :

Transmission et amplification éventuelle de la perturbation.

Puis :

Évolution des conditions favorables ou défavorables.

Puis :

Évolution des IFH.

Puis :

Évolution de l'Harmonie.

Puis :

Souffrance éventuellement produite ou aggravée.

Les mécanismes de neutralisation, de protection et d'adaptation peuvent intervenir à plusieurs niveaux de cette chaîne.

En particulier :

Une augmentation de Pn(t), si cette variable représente effectivement une capacité de neutralisation plus forte selon les définitions retenues, peut réduire les conséquences de la perturbation.
Une augmentation de A_eff(t) réduit V(t) dans la formule candidate.
Une réduction de V(t) ne garantit pas une diminution immédiate de la Souffrance déjà produite.
La Souffrance peut persister après une amélioration de la vulnérabilité,

notamment lorsque les dommages sont durables, que les stocks sont épuisés ou que les conditions favorables nécessaires au rétablissement ne sont pas encore réunies.

La relation entre V(t), les conditions favorables ou défavorables, les IFH, l'Harmonie et la Souffrance doit donc être étudiée dans le temps.

9. Relation avec le modèle TEC
L'intégration de V(t) dans le modèle TEC nécessite de distinguer clairement la vulnérabilité systémique de la dynamique diplomatique.

On utilise désormais D_dip(t) pour désigner la variable diplomatique.

D_dip(t) ne doit pas être confondue avec D_dep(t), qui représente la dépendance critique dans le calcul de V(t).

9.1. Vulnérabilité, perturbation et expansion
Une vulnérabilité élevée associée à une perturbation importante peut favoriser l'aggravation d'une crise et contribuer à une dynamique d'expansion.

On peut représenter cette hypothèse ainsi :

V(t) en hausse + Pe(t) en hausse.

Cela correspond à un risque accru d'expansion, sous réserve des mécanismes de neutralisation, des capacités d'adaptation, des décisions des acteurs et des possibilités de désescalade.

Cette relation est une hypothèse à tester. Elle ne signifie pas que l'augmentation de ces deux variables suffit toujours à provoquer l'expansion.

9.2. Réduction de la vulnérabilité, diplomatie et condensation
À l'inverse, une diminution de la vulnérabilité accompagnée d'une baisse de l'escalade et d'une dynamique diplomatique efficace peut favoriser une transition vers la condensation.

On peut représenter cette hypothèse ainsi :

V(t) en baisse + Pe(t) en baisse + D_dip(t) efficace.

Ces conditions peuvent favoriser la condensation.

La diplomatie seule ne suffit donc pas nécessairement.

Son efficacité doit être évaluée à partir de ses effets observables sur les mécanismes qui entretiennent la crise : réduction des perturbations, diminution des menaces, rétablissement des échanges, renforcement des solutions de substitution ou baisse de la vulnérabilité.

Il ne faut pas intégrer automatiquement D_dip(t) dans la formule de V(t). Si la diplomatie améliore effectivement l'adaptation, la protection ou la neutralisation, son influence peut être représentée par les changements observés dans les variables correspondantes.

Cette distinction permet d'éviter de compter deux fois le même effet.

10. V(t) et l'hypothèse H5
La variable V(t) permet d'affiner le test de l'hypothèse H5.

L'objectif n'est plus seulement de rechercher une relation générale entre les variables dynamiques et les IFH.

Il s'agit de tester une chaîne temporelle plus détaillée :

Variables dynamiques et perturbations.

Puis :

Évolution de V(t).

Puis :

Modification de la transmission des perturbations.

Puis :

Évolution des conditions favorables ou défavorables.

Puis :

Évolution des IFH.

Puis :

Évolution de l'Harmonie et de la Souffrance.

Les différentes étapes peuvent présenter des délais de réponse différents.

Les variables dynamiques peuvent changer rapidement.

La vulnérabilité peut ensuite évoluer selon les adaptations, les substitutions, l'épuisement des réserves et les modifications des dépendances critiques.

Les IFH structurels peuvent évoluer plus lentement.

La Souffrance peut persister après une amélioration de V(t), car les conséquences d'une perturbation ne disparaissent pas nécessairement au même rythme que les facteurs qui l'ont produite.

Cette structure fournit un moyen de tester les délais temporels au lieu de supposer qu'ils sont identiques.

Pour tester H5, il faudra notamment :

Établir une chronologie des perturbations.
Estimer séparément D_dep(t), E(t), K(t) et A_eff(t).
Calculer Vs(t), puis V(t), selon une méthode constante.
Documenter les changements observés dans les conditions favorables ou défavorables.
Suivre l'évolution des IFH et de la Souffrance.
Rechercher les délais plausibles entre ces évolutions.
Comparer les résultats à des explications concurrentes.
Rechercher des contre-exemples, notamment des situations où la chaîne attendue ne se produit pas.
Une association temporelle ne suffira pas, à elle seule, à établir une causalité.

## 11. Contrôle méthodologique selon ARI v1.2

La formule de V(t) doit être soumise au contrôle ARI v1.2 avant toute prétention à une validation externe.

### 11.1. Cohérence de la représentation

V(t) représente une vulnérabilité systémique et non une mesure directe de la Souffrance.

La vulnérabilité structurelle et la vulnérabilité résultante doivent également rester distinctes.

11.2. Définitions indépendantes
Les quatre composantes doivent être définies indépendamment et de manière reproductible :

D_dep(t) : dépendance critique.
E(t) : exposition.
K(t) : concentration et insuffisance de redondance.
A_eff(t) : capacité d'adaptation effective.
La variable diplomatique D_dip(t) doit disposer de sa propre définition et de ses propres critères de mesure.

11.3. Normalisation
Toutes les composantes utilisées dans la formule doivent être normalisées entre 0 et 1 selon des règles documentées.

La normalisation ne garantit pas, à elle seule, que les variables soient comparables ou mesurées avec une précision suffisante.

11.4. Cohérence des relations
Selon la formule candidate :

Une augmentation de D_dep(t), toutes choses égales par ailleurs, augmente Vs(t).
Une augmentation de E(t), toutes choses égales par ailleurs, augmente Vs(t).
Une augmentation de K(t), toutes choses égales par ailleurs, augmente Vs(t).
Une augmentation de A_eff(t), toutes choses égales par ailleurs, diminue V(t).
Ces propriétés sont des conséquences mathématiques de la formule. Elles ne démontrent pas encore que celle-ci représente correctement les systèmes réels.

11.5. Contrôle du calcul
Le calcul doit être reproductible et produire une valeur comprise entre 0 et 1 lorsque les entrées respectent les bornes prévues.

Les valeurs d'entrée, les règles de normalisation, les pondérations et les éventuelles données manquantes doivent être consignées.

11.6. Conservation de la portée et du niveau d'analyse
Une estimation de la vulnérabilité d'une route maritime ne doit pas être présentée automatiquement comme une estimation de la vulnérabilité d'un pays entier ou du système mondial.

L'échelle géographique, la fonction étudiée, la période et le périmètre du système doivent rester explicites.

11.7. Proportionnalité probatoire
Un résultat numérique calculé correctement ne constitue pas, à lui seul, une validation empirique.

Il faut distinguer :

la cohérence mathématique de la formule ;
la fiabilité des données d'entrée ;
la reproductibilité de l'estimation ;
la capacité à expliquer des cas historiques ;
la capacité à anticiper des observations nouvelles.
11.8. Test externe et réfutabilité
La formule doit être testée sur des cas historiques indépendants et confrontée à des contre-exemples.

Il faudra notamment vérifier si elle distingue correctement des situations présentant :

une vulnérabilité élevée et une Souffrance faible ;
une vulnérabilité élevée et une Souffrance élevée ;
une diminution de la vulnérabilité alors que la Souffrance demeure élevée ;

une fonction maintenue grâce à une adaptation coûteuse ou temporaire ;
une augmentation de la vulnérabilité précédant une dégradation des IFH ;
une augmentation de la vulnérabilité sans dégradation ultérieure observable.
La formule devra être révisée si elle ne permet pas de distinguer suffisamment ces configurations ou si ses résultats dépendent excessivement de choix arbitraires de normalisation ou de pondération.

12. Statut méthodologique
Les formules suivantes constituent une formulation candidate du Cycle 2 :

$Vs(t) = [D_dep(t) + E(t) + K(t)] / 3$

$V(t) = Vs(t) \times [1 - A_eff(t)]$

Elles ne sont pas encore une loi démontrée du modèle IFH-TEC.

La distinction entre D_dep(t) et D_dip(t) corrige une ambiguïté de notation. Elle ne suffit pas, à elle seule, à valider la formule sur le plan empirique.

La formule devra être testée sur :

les événements documentés du Cycle 1 ;
les observations du Cycle 2 ;
des cas où V(t) est élevée et la Souffrance faible ;
des cas où V(t) est élevée et la Souffrance élevée ;
des cas où V(t) diminue alors que la Souffrance persiste ;
des cas où l'adaptation maintient la fonction malgré une vulnérabilité structurelle persistante ;
des cas où la vulnérabilité augmente avant la dégradation des IFH ;
des cas où la vulnérabilité augmente sans dégradation ultérieure observable.
Les comparaisons historiques devront utiliser des définitions, des échelles et des méthodes de calcul suffisamment constantes.

Tout changement de méthode devra être documenté afin d'éviter de confondre une évolution réelle du système avec un changement de mesure.

Enfin, la formule devra être comparée à d'autres modèles possibles, notamment à des variantes utilisant des pondérations différentes ou représentant explicitement les interactions entre les composantes.

Conclusion
V(t) permet d'introduire dans IFH-TEC une dimension essentielle : la capacité d'un système à absorber une perturbation avant que celle-ci ne se transforme en dégradation structurelle.

La Souffrance décrit principalement un état défavorable effectivement produit.

V(t) cherche à décrire la vulnérabilité du système face aux perturbations susceptibles de produire ou d'aggraver cet état.

La distinction peut être résumée ainsi :

V(t) : vulnérabilité systémique résultante.
Perturbation et V(t) : facteurs contribuant au risque de transmission et d'amplification.
Conditions défavorables : conditions susceptibles de dégrader le fonctionnement et la formation harmonieuse.
IFH et Harmonie : dimensions de l'état structurel du système.
Souffrance : dégradation effectivement produite et vécue par les entités concernées.
La notation est désormais sans ambiguïté :

D_dep(t) désigne exclusivement la dépendance critique dans le calcul de V(t).
D_dip(t) désigne exclusivement la dynamique diplomatique dans le modèle TEC.

Cette correction améliore la cohérence de la représentation, mais ne préjuge pas de la validité empirique de la formule.

C'est précisément le rôle d'ARI v1.2 : ne pas protéger une formule contre la critique, mais la soumettre à des définitions explicites, à des données reproductibles, aux contre-exemples et à la possibilité de révision.

## III. IFH-TEC — V(t) : clarification et spécification opérationnelle consolidée

IFH-TEC — V(t) : clarification et spécification opérationnelle consolidée
Statut : proposition de consolidation méthodologique pour le Cycle 2
Protocole : ARI v1.2
Laboratoire : ARIANE / IFH-TEC
Cycle 1 : archive historique inchangée

———

### 1. Objet de la mesure

V(t) vise à évaluer la vulnérabilité d'un système face à un scénario de perturbation défini et sur un horizon temporel déterminé.
Il ne constitue ni une probabilité d'effondrement, ni une mesure directe des dommages, ni une mesure générale du risque.
La notation retenue est :
[ V(t_0\mid s,h) ]
où :
• (t_0) désigne la date de référence de l'évaluation ;
• (s) désigne le scénario de perturbation étudié ;
• (h) désigne l'horizon temporel considéré.
La vulnérabilité est ainsi évaluée en fonction du système, de son état à la date de référence, du scénario étudié et de l'horizon retenu.
La date de référence doit être distinguée de la période pendant laquelle la perturbation se produit et de la période nécessaire à la récupération du système.
V(t) caractérise une vulnérabilité conditionnelle à un scénario et à un horizon donnés. Deux évaluations portant sur des scénarios ou des horizons différents ne sont donc pas directement comparables sans précautions méthodologiques.

### 2. Définition des composantes

$D_{dep}(t_0)$ — Dépendance critique
Degré auquel les fonctions essentielles dépendent d'une ressource, d'un acteur ou d'un composant particulier.
La mesure porte sur la criticité de cette dépendance et sur les conséquences fonctionnelles de son indisponibilité.
Elle doit notamment tenir compte :
• de l'importance de la ressource ou de l'acteur concerné ;
• de la possibilité de substitution ;
• du délai nécessaire au remplacement ;
• des conséquences fonctionnelles de son indisponibilité ;
• des dépendances communes entre plusieurs ressources apparemment distinctes.
$E(t_0|s)$ — Exposition
Degré d'exposition des capacités essentielles du système au scénario de perturbation défini.
La mesure porte sur la proportion des fonctions et capacités susceptibles d'être atteintes.
L'intensité, la fréquence, la durée et l'étendue de la perturbation sont décrites séparément afin de ne pas les compter une seconde fois dans la mesure de l'exposition.

L'exposition doit être évaluée par rapport à un périmètre fonctionnel explicite et à des capacités de référence identifiées.

$K(t_0)$ — Concentration structurelle

Degré de concentration des fonctions critiques et insuffisance de solutions structurelles indépendantes.

La mesure porte sur l'architecture existant avant la perturbation, notamment :

- la concentration des capacités ;
- les points de défaillance uniques ;
- le déficit de redondance ;
- la diversité réelle des ressources et des itinéraires ;
- les dépendances communes entre les solutions alternatives.

Deux solutions partageant une même dépendance critique ne sont pas considérées comme pleinement indépendantes.

La présence théorique de plusieurs solutions ne suffit donc pas à établir l'existence d'une redondance structurelle effective.

$A_eff(t_0|s,h)$ — Efficacité adaptative

Capacité réellement mobilisable pour répondre à la perturbation dans le délai défini et maintenir les fonctions essentielles pendant l'horizon considéré.

Elle prend en compte :

- la mobilisation effective des solutions ;
- leur efficacité opérationnelle ;
- les délais d'activation ;
- les ressources nécessaires ;
- les contraintes d'utilisation ;
- les capacités réellement disponibles ;
- la qualité du service maintenu ;
- la soutenabilité de la réponse pendant l'horizon considéré.

Elle mesure la capacité effectivement maintenue grâce à l'adaptation et non la simple existence théorique d'une solution alternative.

Une capacité annoncée ou nominale ne peut être assimilée automatiquement à une capacité opérationnelle.

Par exemple, un lit hospitalier ne constitue une capacité de soins réellement mobilisable que si les personnels, les équipements, les fournitures et les conditions opérationnelles nécessaires sont disponibles.

De même, une infrastructure de substitution ne constitue une adaptation effective que si elle peut absorber une capacité supplémentaire dans des délais et à des conditions compatibles avec le maintien des fonctions essentielles.

L'efficacité adaptative doit être appréciée au regard des seuils minimaux de fonctionnement définis pour les fonctions essentielles.

Il convient de distinguer trois niveaux de connaissance :

1. Adaptation théorique : une solution alternative existe ou est annoncée.
2. Adaptation observée : des changements opérationnels démontrent que cette solution a effectivement été mobilisée.
3. Adaptation quantifiée : les données permettent de mesurer la proportion de capacité effectivement maintenue grâce à cette adaptation.

Une adaptation observée constitue une information empirique exploitable, même lorsque son efficacité exacte n'est pas encore quantifiable.

3. Règle de séparation des variables

La distinction entre $K(t_0)$ et $A_eff(t_0|s,h)$ constitue une règle fondamentale du modèle.

K mesure la structure préexistante du système.

A_eff mesure la mobilisation et l'efficacité de la réponse adaptative.

L'existence d'une solution alternative est comptabilisée dans l'analyse structurelle. Son activation, ses délais, ses performances opérationnelles et sa soutenabilité sont évalués dans l'analyse adaptative.

Chaque donnée brute est affectée à une seule composante du calcul. Tout chevauchement doit être documenté et justifié.

Une capacité alternative ne peut donc pas être comptabilisée simultanément comme une redondance structurelle supplémentaire et comme une capacité adaptative disponible, sans distinction entre ces deux propriétés.

Les dépendances communes entre solutions doivent également être recherchées.

Plusieurs solutions partageant un même acteur, une même infrastructure ou une même ressource critique ne constituent pas nécessairement des alternatives indépendantes.

Les corrélations statistiques entre composantes doivent être distinguées des doubles comptages réels : une corrélation n'établit pas à elle seule une duplication de données, mais constitue un signal nécessitant un examen.

4. Formule candidate conservée

La vulnérabilité structurelle et fonctionnelle de référence est calculée ainsi :

$$ V_s(t_0\mid s)= \frac{D_{\mathrm{dep}}(t_0)+E(t_0\mid s)+K(t_0)}{3} $$

La vulnérabilité après prise en compte de l'adaptation est calculée ainsi :

$$ \boxed{ V(t_0\mid s,h)= V_s(t_0\mid s) \left[1-A_{\mathrm{eff}}(t_0\mid s,h) \right] } $$

Les quatre composantes sont normalisées entre 0 et 1.

La pondération égale et la réduction multiplicative par l'adaptation demeurent des hypothèses méthodologiques à tester. Elles ne constituent pas des lois démontrées.

Le choix de la moyenne arithmétique suppose une certaine compensation entre les dimensions. Sa robustesse devra donc être examinée par comparaison avec d'autres pondérations et méthodes d'agrégation.

Une attention particulière doit être portée aux situations dans lesquelles une faiblesse extrême sur une fonction essentielle pourrait être masquée par des valeurs plus favorables sur les autres fonctions.

Le modèle doit donc conserver les valeurs individuelles des composantes et documenter les éventuelles défaillances critiques.

Une règle complémentaire de seuil critique pourra être étudiée pour déterminer si certaines fonctions essentielles nécessitent un traitement non compensatoire.

Le score global doit toujours être accompagné des valeurs individuelles des composantes.

4.1. Règle de calcul en présence de données incomplètes

L'insuffisance de données ne doit plus entraîner automatiquement l'indisponibilité du score global.

Trois statuts de calcul sont désormais distingués.

A. Score calculé

Toutes les composantes disposent de mesures suffisamment documentées, avec des périmètres et des dénominateurs cohérents.

Le score peut être présenté comme une estimation quantitative construite à partir des données disponibles, sous réserve de ses incertitudes.

B. Score provisoire

Une ou plusieurs composantes ne disposent pas encore de mesures directes complètes, mais des observations empiriques, des indicateurs indirects ou des proxys documentés permettent de construire une estimation provisoire.

Dans ce cas :

- les valeurs disponibles sont utilisées ;
- les proxys sont explicitement identifiés ;
- les estimations provisoires sont distinguées des mesures directes ;
- les données manquantes sont indiquées ;
- le score est calculé et publié ;
- son statut provisoire est conservé jusqu'à amélioration des données.

Le score provisoire n'est pas une validation empirique définitive. Il constitue néanmoins un résultat de travail quantifié, qui peut être comparé ultérieurement à une estimation enrichie.

C. Score non calculable

Ce statut est réservé aux situations dans lesquelles les données disponibles ne permettent même pas de construire une estimation raisonnablement bornée des composantes.

Il ne doit pas être utilisé simplement parce qu'une donnée idéale ou parfaitement exhaustive n'est pas disponible.

4.2. Gestion des estimations provisoires

Une valeur provisoire doit être accompagnée de sa justification.

Il convient notamment de préciser :

- la donnée empirique utilisée ;
- la transformation appliquée ;
- le caractère direct ou indirect de la mesure ;
- les limites du proxy ;
- la confiance accordée à l'estimation ;
- les informations qui permettraient de la remplacer par une mesure plus précise.

Lorsqu'une composante ne peut être mesurée directement, une estimation de travail peut être proposée à partir des éléments disponibles, mais elle ne doit jamais être présentée comme une observation directe.
Si plusieurs valeurs sont plausibles, une fourchette de sensibilité doit être calculée.
Une valeur centrale provisoire peut être publiée, accompagnée de cette fourchette et d'une indication explicite de son incertitude.

### 4.3. Principe de révision du score

Un score provisoire reste valable comme état de référence du calcul à la date considérée, jusqu'à ce que de nouvelles données justifient sa révision.
L'arrivée de nouvelles données ne doit pas conduire à effacer l'ancien score.
Les deux résultats doivent être conservés :

- score provisoire initial ;
- score recalculé avec les données enrichies.

Cette conservation permet de mesurer l'effet réel de l'amélioration des informations sur l'estimation de la vulnérabilité.

## 5. Méthode de construction des indicateurs

Chaque composante est calculée à partir d'indicateurs observables et documentés.
Pour un ensemble de fonctions essentielles indexées par i, on définit un poids de criticité w_i, fixé avant l'analyse.
Les composantes peuvent alors être construites selon la forme générale :

$$ D_{\mathrm{dep}}= \frac{\sum_i w_i d_i}{\sum_i w_i} $$
$$ E= \frac{\sum_i w_i e_i}{\sum_i w_i} $$
$$ K= \frac{\sum_i w_i k_i}{\sum_i w_i} $$
$$ A_{\mathrm{eff}}= \frac{\sum_i w_i a_i}{\sum_i w_i} $$

Avec :

- d_i : niveau de dépendance critique de la fonction ;
- e_i : proportion de sa capacité exposée au scénario ;
- k_i : déficit de redondance structurelle indépendante ;
- a_i : proportion de capacité effectivement maintenue grâce à l'adaptation.

Les règles de conversion des données brutes en valeurs comprises entre 0 et 1 doivent être définies avant les calculs.
Les dénominateurs, les périmètres fonctionnels et les pondérations doivent rester cohérents entre les différentes composantes.
Les pondérations ne doivent pas être choisies après observation des résultats dans le but d'obtenir un score particulier.

### 5.1. Définition des capacités de référence

Pour chaque fonction essentielle, il convient de définir :

- la capacité de référence ;
- le niveau minimal de fonctionnement acceptable ;
- les ressources nécessaires au maintien de cette fonction ;
- les délais maximaux acceptables d'interruption ;
- les exigences de qualité et de sécurité.

Cette définition permet de distinguer la capacité nominale, la capacité effectivement disponible et la capacité fonctionnelle réellement maintenue.

### 5.2. Mesure de l'efficacité adaptative

La valeur a_i doit représenter la proportion de la fonction effectivement maintenue grâce aux capacités adaptatives.
Elle ne doit pas être calculée à partir de la seule existence d'une solution alternative.
Son évaluation doit intégrer la capacité réellement mobilisable, les délais d'activation, les contraintes de ressources, les performances obtenues et la soutenabilité de la réponse.
Une adaptation temporairement efficace ne doit pas être considérée automatiquement comme soutenable sur un horizon plus long.
Les règles de mesure doivent être fixées avant l'observation des résultats.

### 5.3. Mesure indirecte et proxys empiriques

Lorsque la mesure directe de a_i n'est pas disponible, des indicateurs indirects peuvent être utilisés.
Ils peuvent notamment porter sur :

- la proportion du trafic ou du service maintenue ;
- la proportion des flux effectivement reroutés ;
- l'évolution des capacités disponibles sur les itinéraires alternatifs ;
- les délais de rétablissement ;

• les niveaux de congestion ;
• les pertes de service résiduelles ;
• la continuité des fonctions essentielles pendant la perturbation.
Ces indicateurs ne sont pas automatiquement équivalents à A_eff.
Il faut établir le lien entre le proxy et la capacité maintenue grâce à l'adaptation.
Par exemple, un trafic qui continue de circuler ne prouve pas nécessairement que son maintien résulte d'un reroutage : il peut aussi correspondre à un trafic qui n'a jamais été affecté.
La comparaison avant, pendant et après la perturbation, ainsi que l'identification des routes alternatives effectivement utilisées, sont donc essentielles.
Lorsqu'une mesure directe est impossible, le proxy retenu peut néanmoins servir à construire un score provisoire, sous réserve d'indiquer explicitement ce qu'il mesure réellement.
6. Chaîne d'analyse
L'analyse IFH-TEC distingue six étapes :
1. Perturbation : nature, intensité, fréquence, durée et étendue du phénomène.
2. Exposition : part des capacités du système concernées par le scénario.
3. Vulnérabilité : dépendance, exposition et concentration structurelle.
4. Réponse adaptative : capacités effectivement mobilisées et efficacité de leur fonctionnement.
5. Conséquences : dommages humains, matériels, économiques, sociaux et environnementaux.
6. Récupération : retour éventuel à un fonctionnement acceptable et délais nécessaires.
Les conséquences et la récupération sont des résultats observables permettant d'évaluer le modèle.
Elles ne sont pas ajoutées rétroactivement aux composantes de V(t).
Cette séparation évite de confondre la vulnérabilité préalable, les réponses effectivement apportées et les dommages finalement constatés.
La fin d'une perturbation ne correspond pas nécessairement au rétablissement du fonctionnement normal.
Il convient donc de distinguer :
• la fin de la perturbation initiale ;
• le rétablissement des infrastructures ;
• le rétablissement des capacités fonctionnelles ;
• le retour des flux et services à un niveau acceptable ;
• la récupération durable du système.
Ces différentes temporalités doivent être documentées séparément.
7. Conditions de calcul
Tout calcul de V(t) doit préciser :
• le système étudié ;
• les fonctions essentielles retenues ;
• le scénario de perturbation ;
• la date de référence ;
• la période de perturbation considérée ;
• l'horizon temporel ;
• les capacités de référence ;
• les seuils minimaux de fonctionnement ;
• les indicateurs bruts utilisés ;
• les dénominateurs retenus ;
• les règles de normalisation ;
• les pondérations ;
• les sources et la qualité des données ;
• les incertitudes ;
• les éventuelles données manquantes ;
• le statut de chaque composante : mesurée, estimée ou approchée par un proxy.
Les corrélations entre composantes doivent être examinées afin de détecter les doubles comptages et les dépendances statistiques excessives.
Les pondérations, la méthode d'agrégation et la sensibilité des résultats aux hypothèses doivent faire l'objet de comparaisons documentées.
Les solutions alternatives doivent être examinées en tenant compte de leurs dépendances communes et de leur capacité supplémentaire réellement disponible.

Les comparaisons entre plusieurs évaluations doivent respecter autant que possible des périmètres fonctionnels, des scénarios, des horizons et des règles de mesure homogènes.
Si ces conditions ne sont pas réunies, les différences de scores ne doivent pas être interprétées directement comme des évolutions réelles de vulnérabilité.
Toutefois, l'absence de données parfaites ne doit pas empêcher la production d'un score provisoire lorsque des informations empiriques exploitables existent.

## 8. Protocole de validation

La validation devra comparer V(t) à un ou plusieurs modèles de référence plus simples, sur des cas indépendants.
Deux propriétés seront testées séparément.

### A. Qualité diagnostique

Capacité à caractériser correctement la vulnérabilité d'un système à partir des informations disponibles à la date d'évaluation.
Cette évaluation devra examiner la cohérence entre les caractéristiques structurelles et fonctionnelles du système et le diagnostic produit.

### B. Qualité prédictive

Capacité à améliorer l'anticipation des conséquences futures par rapport aux modèles de référence.
Les tests devront respecter une séparation temporelle entre les données utilisées pour établir les estimations et les observations utilisées pour évaluer les résultats.
Les résultats négatifs et les contre-exemples seront conservés.
Aucun succès isolé ne suffira à établir une validité générale.
La validation devra également examiner :

- la stabilité des résultats lorsque les pondérations sont modifiées ;
- la sensibilité aux règles de normalisation ;
- la comparaison entre différentes méthodes d'agrégation ;
- les effets des données manquantes ;
- les éventuels doubles comptages ;
- la reproductibilité des résultats entre analystes ;
- la capacité du modèle à traiter les défaillances critiques ;
- sa performance sur plusieurs domaines d'application.

La comparaison avec des modèles de référence devra notamment déterminer si la complexité supplémentaire de V(t) apporte une amélioration mesurable.
Un modèle plus complexe ne doit pas être considéré comme supérieur simplement parce qu'il intègre davantage de variables.

### 8.1. Validation progressive

La validation peut progresser par niveaux :

- Niveau 1 : cohérence des définitions et calcul reproductible ;
- Niveau 2 : confrontation avec des observations empiriques ;
- Niveau 3 : mesure suffisamment documentée des quatre composantes ;
- Niveau 4 : comparaison diagnostique avec des modèles de référence ;
- Niveau 5 : tests prédictifs sur des cas indépendants.

L'absence d'accès à certaines données opérationnelles peut empêcher de franchir un niveau sans invalider les résultats déjà établis aux niveaux précédents.
Une validation partielle doit donc être identifiée comme telle, plutôt que confondue avec une absence totale de résultat.

## 9. Applications exploratoires

### 9.1. Cas d'Ormuz

La confrontation initiale avec les données du cas Ormuz a permis de calculer plusieurs indicateurs intermédiaires :

- la capacité théorique de contournement pétrolier ;
- l'évolution du trafic maritime observable ;
- la compensation partielle des pertes de GNL par la production extérieure au Golfe.

Ces observations montrent l'intérêt de distinguer les dépendances, les capacités de substitution et les adaptations effectivement mobilisées.
Elles ne suffisent cependant pas encore à produire un score global V(t) reproductible.
Les mesures harmonisées de toutes les composantes, sur un périmètre fonctionnel et un horizon temporel communs, restent nécessaires.
Cette application constitue une première confrontation empirique de la méthode, et non sa validation définitive.

### 9.2. Test comparatif sur le blocage du canal de Suez

Le blocage du canal de Suez par le porte-conteneurs Ever Given en mars 2021 a constitué un premier terrain d'application exploratoire.

Ce cas a permis d'examiner :

- la dépendance des flux commerciaux au passage stratégique ;
- l'exposition des flux à une interruption totale ;
- la concentration des itinéraires maritimes ;
- l'existence de solutions de contournement ;
- les délais et contraintes associés à leur utilisation ;
- la différence entre rétablissement du passage et récupération des flux logistiques.

Des observations documentées ont notamment montré que le contournement par le cap de Bonne-Espérance était possible, mais impliquait des délais et des coûts supplémentaires.

Le cas a également mis en évidence que la fin du blocage ne correspondait pas immédiatement au retour à un fonctionnement logistique normal.

Ce premier examen a révélé plusieurs exigences complémentaires :

- définir les dénominateurs permettant de mesurer les capacités exposées ;
- distinguer les alternatives théoriques des capacités réellement mobilisables ;
- mesurer les performances fonctionnelles des solutions de substitution ;
- distinguer la fin de la perturbation de la récupération ;
- comparer les résultats à des indicateurs de référence plus simples.

Les données disponibles ne permettaient pas de construire quatre composantes suffisamment harmonisées et documentées.

Aucun score global V(t) reproductible n'a donc été calculé pour ce cas.

Ce résultat ne constitue pas une validation quantitative. Il constitue un enseignement méthodologique issu d'une application exploratoire.

### 9.3. Extension à d'autres domaines

La transposabilité conceptuelle de V(t) a également été examinée sur des systèmes énergétiques et sanitaires.

Ces examens ont montré que les quatre dimensions peuvent être formulées dans des domaines différents.

Ils ont notamment mis en évidence l'importance de distinguer les capacités nominales des capacités effectivement opérationnelles, ainsi que les dépendances communes entre ressources et solutions alternatives.

Ces observations ne constituent pas une validation intersectorielle de la formule.

Des indicateurs comparables, des calculs reproductibles et des évaluations indépendantes restent nécessaires.

### 9.4. Cas des câbles sous-marins de la mer Rouge — février 2024

Ce cas constitue une application exploratoire supplémentaire consacrée à la dépendance des communications internationales aux câbles sous-marins et à la réponse adaptative consécutive aux dommages de février 2024.

Les observations disponibles documentent notamment :

- l'interruption ou la dégradation de plusieurs systèmes de câbles ;
- les modifications de routage observées par des opérateurs et des observateurs du réseau ;
- le recours à des itinéraires de transit alternatifs ;
- l'augmentation de l'utilisation de certains opérateurs de transit ;
- les annonces de reroutage vers l'Europe par la Chine continentale, les États-Unis et d'autres systèmes de câbles ;
- le maintien du trafic dans certains territoires surveillés par Cloudflare ;
- la persistance de perturbations et de congestions signalées par certains opérateurs.

Les observations de Kentik relatives aux changements de transit constituent une preuve empirique de la mobilisation de solutions adaptatives. Les annonces d'HGC documentent les itinéraires alternatifs envisagés ou mobilisés. Les observations de Cloudflare et les diagnostics de RETN apportent des informations complémentaires sur les conséquences pour le trafic.

Il faut toutefois distinguer les périmètres de ces sources : elles ne mesurent pas toutes le même trafic, les mêmes territoires ni les mêmes services.

#### 9.4.1. Résultat relatif à l'adaptation

L'adaptation ne relève pas ici d'une simple possibilité théorique.

Les changements de transit et de routage observés démontrent que des solutions

alternatives ont effectivement été mobilisées.
La variable A_eff dispose donc d'un appui empirique concernant l'existence et la mise en œuvre de l'adaptation.
En revanche, les données publiques retrouvées ne fournissent pas encore les volumes homogènes nécessaires pour calculer exactement la proportion de capacité maintenue grâce à ces adaptations.
Il manque notamment :
• les volumes de trafic avant et pendant l'incident pour un même réseau ;
• les volumes effectivement transférés sur les itinéraires alternatifs ;
• les capacités disponibles et utilisées sur ces itinéraires ;
• la part du trafic qui aurait été perdue en l'absence de reroutage ;
• la durée pendant laquelle les solutions alternatives ont maintenu le service.
L'absence de ces informations empêche une mesure directe et complète de A_eff, mais n'annule pas les observations empiriques déjà obtenues.
9.4.2. Score provisoire de travail
Un premier score de travail a été établi à partir des estimations initialement utilisées pour cette application :
[ D_{\mathrm{dep}}=0,80 ]
[ E=0,25 ]
[ K=0,90 ]
La vulnérabilité structurelle estimée est donc :
[ V_s=\frac{0,80+0,25+0,90}{3} ]
[ V_s=0,65 ]
Une première valeur conventionnelle de continuité observée a été obtenue à partir de la part de trafic déclarée comme affectée par HGC :
[ A_{\mathrm{cont}}^{*}=1-0,25=0,75 ]
Cette valeur représente un proxy de continuité du trafic non déclaré affecté. Elle ne constitue pas une mesure directe de la capacité maintenue grâce au reroutage.
En utilisant provisoirement ce proxy dans la formule, le score de travail est :
[ V^{*}=0,65\times(1-0,75) ]
[ \boxed{V^{*}=0,1625} ]
Soit :
[ \boxed{V^{*}=16,25/100} ]
Statut du résultat : score provisoire de travail, non validé quantitativement. Ce score est conservé comme point de référence de l'application exploratoire. Il ne doit pas être présenté comme une mesure définitive de la vulnérabilité réelle.
Deux réserves doivent être conservées :
1. Le proxy de continuité de 0,75 ne mesure pas directement la contribution causale du reroutage.
2. Les estimations de dépendance, d'exposition et de concentration utilisées dans ce calcul doivent encore être harmonisées et vérifiées sur un même périmètre fonctionnel.
Le score de 16,25/100 constitue donc un résultat provisoire calculé, et non une valeur empiriquement validée.
Il ne doit pas être effacé au motif que les données sont incomplètes. Il doit être conservé, documenté et recalculé lorsque de nouvelles données permettront de mieux mesurer les composantes.
9.4.3. Données nécessaires à la révision
La révision de ce score devra prioritairement rechercher :
• les séries de trafic avant, pendant et après les coupures ;
• les volumes transférés sur les itinéraires alternatifs ;
• les capacités supplémentaires réellement disponibles ;
• les taux de congestion sur les routes de substitution ;
• les délais de mobilisation et de rétablissement ;
• les différences de performance entre les réseaux et territoires concernés.
Les données obtenues devront être rapportées au même périmètre fonctionnel avant de recalculer les composantes.
Conclusion de l'application : l'existence d'une adaptation effective est empiriquement documentée. L'efficacité quantitative de cette adaptation reste à préciser. Un score provisoire de 16,25/100 est conservé comme référence exploratoire, dans l'attente d'une mesure plus complète.
10. Décision de versionnement

Cette spécification constitue une proposition de consolidation méthodologique pour le Cycle 2, dans le cadre d'ARI v1.2.
Elle ne modifie pas rétroactivement le Cycle 1, ses 140 prédictions ou son bilan prédictif.
La formule conserve son statut expérimental jusqu'à validation empirique indépendante.
Toute évolution ultérieure devra être documentée, justifiée et versionnée.
Les modifications apportées à cette spécification renforcent :
• les exigences de construction des indicateurs ;
• la séparation des composantes ;
• la mesure de l'adaptation ;
• l'évaluation de la récupération ;
• la gestion des données manquantes ;
• la possibilité de produire un score provisoire ;
• la conservation des scores successifs lors de l'amélioration des données.
Elles ne constituent pas une validation définitive de la formule ni une démonstration de sa supériorité sur les modèles de référence.
Conclusion générale
La séparation entre dépendance critique, exposition, concentration structurelle et adaptation est explicitement définie.
Le risque de double comptage entre K(t) et A_eff(t) dispose d'une règle de traitement renforcée par l'examen des dépendances communes entre solutions alternatives.
La perturbation, la vulnérabilité, la réponse adaptative, les conséquences et la récupération sont distinguées dans une chaîne d'analyse cohérente.
La construction des indicateurs prend en compte les capacités de référence, les seuils minimaux de fonctionnement acceptable, les ressources effectivement mobilisables et la soutenabilité des réponses adaptatives.
La temporalité de l'évaluation est précisée par la distinction entre date de référence, scénario, horizon de vulnérabilité et période de récupération.
Les règles de normalisation, de pondération, de calcul, de comparaison et de réfutation sont renforcées.
Les premières applications exploratoires, notamment les cas d'Ormuz, du canal de Suez et des câbles sous-marins de la mer Rouge, ont permis d'identifier des difficultés concrètes de mesure et des exigences supplémentaires de spécification.
Le cas de la mer Rouge montre en particulier que des adaptations peuvent être empiriquement observées même lorsque leur efficacité exacte ne peut pas encore être mesurée. Cette situation ne doit plus empêcher la production d'un score provisoire clairement qualifié et accompagné de ses limites.
La méthode dispose ainsi d'une spécification opérationnelle consolidée et enrichie pour le Cycle 2.
Statut final : méthode opérationnelle spécifiée, applications empiriques exploratoires réalisées, scores provisoires possibles lorsque les données le permettent, validation diagnostique et prédictive générale non acquise.
La cohérence conceptuelle et opérationnelle est renforcée. La confrontation empirique est engagée. La validité générale reste à établir.

———

IFH-TEC — Laboratoire ARIANE
Protocole ARI v1.2 — Cycle 2

## IV. IFH-TEC — Étude comparative de la vulnérabilité des réseaux Internet en Afrique de l'Est

### Coupures simultanées des câbles sous-marins SEACOM et EASSy du 12 mai 2024

Laboratoire : ARIANE / IFH-TEC

Cycle : 2

Protocole : ARI v1.2

Méthode : V(t) — évaluation de la vulnérabilité d'un système face à un scénario de perturbation

Cas étudié : Tanzanie, Kenya et Rwanda

Date de consolidation de l'étude : 6 novembre 2026

Statut : étude empirique exploratoire, avec estimations structurelles par proxys et validation quantitative incomplète.

———

## 1. Objet de l'étude

Cette étude examine les conséquences des dommages simultanés subis par les câbles sous-marins SEACOM et EASSy au large du KwaZulu-Natal, en Afrique du Sud, le 12 mai 2024.

Les réparations des câbles ont été achevées le 3 juin 2024.

L'objectif est d'étudier comment une perturbation commune affecte différemment trois systèmes nationaux présentant des structures de dépendance, des possibilités de redondance et des capacités d'adaptation distinctes.

Les trois pays retenus sont :

• La Tanzanie, directement raccordée à plusieurs câbles sous-marins, dont deux ont été touchés.

• Le Kenya, disposant d'un nombre plus important de câbles et de possibilités de redondance.

• Le Rwanda, pays enclavé qui dépend de liaisons terrestres transfrontalières pour accéder aux infrastructures sous-marines internationales.

L'étude vise à confronter empiriquement la méthode V(t), et plus particulièrement sa capacité à distinguer la vulnérabilité structurelle de l'efficacité réelle des adaptations.

Il ne s'agit pas de mesurer une probabilité d'effondrement d'Internet, mais d'évaluer la vulnérabilité des fonctions et des capacités d'un système face à un scénario de perturbation défini.

## 2. Référentiel méthodologique

L'étude utilise la formule candidate de V(t), conformément à la spécification opérationnelle consolidée pour IFH-TEC Cycle 2 et ARI v1.2.

La vulnérabilité structurelle est définie par :

$$ V_s(t)=\frac{D_{\mathrm{dep}}(t)+E(t)+K(t)}{3} $$

La vulnérabilité après prise en compte de l'adaptation est définie par :

[ V(t)=V_s(t)\times[1-A_{\mathrm{eff}}(t)] ]

Les quatre composantes sont :

• (D_{\mathrm{dep}}) : dépendance critique du système à des ressources, infrastructures ou acteurs indispensables.

• (E) : exposition des fonctions essentielles au scénario de perturbation.

• (K) : concentration structurelle, déficit de redondance et dépendances communes.

• (A_{\mathrm{eff}}) : efficacité adaptative réellement mobilisée et capacité effectivement maintenue grâce à cette adaptation.

Les composantes sont théoriquement normalisées entre 0 et 1.

La pondération égale des trois premières composantes et la réduction multiplicative par l'adaptation constituent des hypothèses opérationnelles à tester. Elles ne sont pas considérées comme des lois démontrées.

Une distinction fondamentale est conservée :

La présence d'une solution alternative, son activation opérationnelle et sa capacité réelle à préserver un service sont trois niveaux de preuve différents.

3. Données empiriques recueillies

3.1. Structure des infrastructures

Le rapport de l'Internet Society fournit les informations structurelles suivantes :

Indicateur

Tanzanie

Kenya

Rwanda

Câbles sous-marins recensés

3

8

0 directement raccordé

Câbles endommagés

2

2

0 directement

Réseaux locaux directement connectés à un IXP

29 %

30 %

17,86 %

Sites web populaires hébergés dans le pays

24,9 %

60 %

19,6 %

Sites populaires hébergés dans la région

48 %

14,8 %

50,6 %

Sites populaires hébergés hors région

26,9 %

25 %

29,6 %

Les proportions d'hébergement correspondent à la répartition des 1 000 sites web les plus visités, et non à l'ensemble des contenus ou des volumes de trafic Internet.

Le Rwanda ne possède pas de raccordement direct à un câble sous-marin dans le tableau étudié. Cela ne signifie absolument pas qu'il n'est pas exposé à une perturbation de ces infrastructures.

Son accès international dépend de liaisons terrestres passant notamment par des pays voisins.

3.2. Impacts observés

Les observations disponibles indiquent des différences importantes entre les trois pays.

Tanzanie

• IODA signale un niveau minimal de connectivité d'environ 39 % de la normale.

• La durée de l'épisode IODA est indiquée à environ 38 heures.

• Le rapport de l'Internet Society fait état d'une baisse de près de 50 % de la connectivité nationale.

• Le trafic local de l'échangeur TIX a diminué de près de 90 %.

• Les itinéraires alternatifs se sont rapidement congestionnés.

• La Tanzanie apparaît comme le pays ayant subi la dégradation la plus importante parmi les trois étudiés.

Kenya

• IODA indique une baisse maximale d'environ 20 % de l'indicateur Active Probing.

• Le signal est progressivement revenu vers ses niveaux habituels jusqu'au 14 mai.

• Les mesures BGP et Telescope ne montrent pas de baisse anormale équivalente.

• L'utilisation du câble TEAMS comme redondance a été signalée.

• Safaricom et Airtel ont également communiqué sur la mise en place de connexions alternatives.

Rwanda

• IODA signale un niveau minimal d'environ 82 % de la normale.

• La durée de l'épisode IODA est indiquée à environ deux heures.

• L'Internet Society relève une légère baisse du trafic de l'échangeur RINEX.

• Les services en ligne hébergés dans le cloud ont été particulièrement affectés.

• La dépendance aux liaisons terrestres transfrontalières constitue un élément important de son exposition.

Ces indicateurs ne mesurent pas tous le même phénomène. Une baisse du signal Active Probing, une baisse du trafic d'un IXP et une diminution de la connectivité nationale ne sont pas directement interchangeables.

Une seconde série d'observations attribuée à NetBlocks et reproduite dans un rapport de Recorded Future indique des niveaux minimaux d'environ 29 % pour la Tanzanie, 89 % pour le Kenya et 81 % pour le Rwanda.

Ces valeurs confortent le contraste général entre les pays, mais doivent rester distinctes des indicateurs IODA.

4. Construction des proxys structurels

Les données brutes nécessaires à une mesure directe et harmonisée de chaque composante n'étant pas toutes accessibles, trois indicateurs indirects ont été construits.

Ils permettent d'obtenir des estimations exploratoires, sans prétendre représenter parfaitement les variables théoriques.

4.1. Proxy de dépendance critique

On utilise la proportion de sites populaires hébergés hors du pays :

[ D_{\mathrm{dep}}^*=1-\text{part des sites hébergés dans le pays} ]

Résultats :

• Tanzanie : (1-0,249=0,751)

• Kenya : (1-0,600=0,400)

• Rwanda : (1-0,196=0,804)

Ce proxy indique une dépendance potentielle à des ressources hébergées hors du territoire national.

Limite : la localisation des 1 000 sites populaires ne représente ni la totalité du trafic, ni la criticité des services, ni les dépendances réelles des fonctions essentielles.

4.2. Proxy de concentration structurelle

On utilise le déficit de connexion directe des réseaux locaux aux IXP :

[ K^*=1-\text{part des réseaux directement connectés à un IXP} ]

Résultats :

• Tanzanie : (1-0,29=0,710)

• Kenya : (1-0,30=0,700)

• Rwanda : (1-0,1786=0,8214)

Ce proxy indique une faiblesse potentielle de l'interconnexion locale directe.

Limite : il ne mesure pas les connexions indirectes, les capacités des interconnexions, les chemins internationaux ni l'indépendance réelle des routes alternatives.

Il ne constitue donc pas une mesure complète de la concentration structurelle.

4.3. Proxy d'exposition

Pour les deux pays directement raccordés aux câbles touchés, on utilise :

[ E^*=\frac{\text{nombre de câbles endommagés}}{\text{nombre de câbles recensés}} ]

Résultats :

• Tanzanie : (2/3=0,667)

• Kenya : (2/8=0,250)

• Rwanda : non mesurable par cet indicateur.

Pour le Rwanda, attribuer une exposition nulle serait une erreur : son exposition dépend de ses routes terrestres, des réseaux de transit et des dépendances internationales.

Il faudrait disposer d'une cartographie des itinéraires terrestres et de leurs dépendances communes pour calculer un indicateur comparable.

5. Résultats des estimations structurelles

La formule utilisée est :

[ V_s^=\frac{D_{\mathrm{dep}}^+E^+K^}{3} ]

Composante

Tanzanie

Kenya

Rwanda

(D_{\mathrm{dep}}^*)

0,751

0,400

0,804

(E^*)

0,667

0,250

Non mesuré

(K^*)

0,710

0,700

0,821

(V_s^*)

0,7093

0,4500

Non déterminé

Les résultats exprimés sur 100 sont :

Pays

Indice structurel exploratoire

Tanzanie

70,93 / 100

Kenya

45,00 / 100

Rwanda

Non déterminé

Pour le Rwanda, si l'on pose uniquement une borne mathématique ($E^*\in[0;1]$), on obtient :

$$[ V_s^*\in[0,5417;0,875] ]$$

Cette fourchette n'est pas un intervalle de confiance empirique. Elle indique seulement l'étendue mathématique possible lorsque l'exposition reste inconnue.

Résultat comparatif : parmi les deux pays pour lesquels les trois proxys peuvent être calculés, la Tanzanie présente une vulnérabilité structurelle estimée supérieure à celle du Kenya.

Le Rwanda présente des valeurs élevées pour les deux proxys disponibles, mais son score structurel complet ne peut pas être établi.

6. Analyse de l'adaptation et de $(A_{\mathrm{eff}})$

Les observations démontrent que des réponses adaptatives ont effectivement été mises en œuvre.

Tanzanie

Des changements de routage et des itinéraires alternatifs ont été documentés. Cependant, ces itinéraires ont rapidement rencontré des congestions et ne disposaient pas d'une capacité suffisante pour absorber toute la charge.

L'adaptation est donc observée, mais son efficacité quantitative n'est pas mesurée.

Kenya

L'utilisation de TEAMS comme solution de redondance a été signalée. Safaricom et Airtel ont également communiqué sur des connexions alternatives.

Le niveau de continuité observé est relativement élevé selon plusieurs indicateurs.

Là encore, il manque les volumes effectivement transportés par chaque itinéraire alternatif et la part du trafic qui aurait été perdue sans ces adaptations.

Rwanda

Le recours aux liaisons terrestres constitue une forme de redondance indirecte.

Toutefois, les informations disponibles ne permettent pas de mesurer précisément la capacité mobilisée, les itinéraires effectivement utilisés et la quantité de services préservée grâce à cette adaptation.

Conclusion sur $A_{\mathrm{eff}}$

Les trois pays présentent des éléments d'adaptation observée, mais aucune série harmonisée ne permet de calculer directement la proportion de capacité maintenue grâce à l'adaptation.

Il est donc incorrect d'assimiler :

$$A_{\mathrm{eff}}=\text{connectivité restante}$$

La connectivité restante peut provenir de capacités qui n'ont jamais été affectées, de services locaux, de caches, d'autres routes ou de véritables mécanismes de reroutage.

Ces contributions doivent être séparées.

7. Pourquoi aucun score V(t) complet n'est retenu

La formule complète est :

$$V(t)=V_s(t)\times[1-A_{\mathrm{eff}}(t)]$$

Nous disposons de proxys structurels pour la Tanzanie et le Kenya, mais pas d'une mesure suffisamment fiable de $A_{\mathrm{eff}}$.

Pour le Rwanda, l'exposition n'est pas non plus quantifiée de manière satisfaisante.

Des calculs antérieurs avaient produit :

• Tanzanie : 43,27 / 100.

• Kenya : 9,00 / 100.

• Rwanda : 9,75 à 15,75 / 100.

Ces valeurs résultaient de l'assimilation du signal IODA restant à l'efficacité adaptative.

Cette assimilation n'étant pas démontrée, ces trois valeurs sont retirées du jeu des résultats V(t).

Elles ne doivent pas être publiées comme des scores valides, ni utilisées pour classer définitivement les pays.

La correction constitue une décision méthodologique du Cycle 2.

8. Limites de l'étude et données manquantes

La principale limite rencontrée est l'accessibilité et l'exploitabilité des données brutes.

Trois situations doivent être distinguées :

1. Données non publiées ou inexistantes dans les sources consultées.

2. Données existantes, mais difficiles à récupérer ou à exploiter techniquement.

3. Données accessibles, mais insuffisamment précises pour mesurer directement une variable.

Données prioritaires encore nécessaires

A. Routage BGP

Les archives RIPE RIS et RouteViews pourraient permettre de reconstituer les changements de routes entre le 11 et le 14 mai 2024.

Les ASN des opérateurs identifiés comprennent notamment :

• Safaricom : AS33771.

• Airtel Kenya : AS36926.

• MTN Rwanda : AS36890.

• Liquid Telecom Rwanda : AS37006.

• KT Rwanda : AS37228.

Les archives historiques ont été identifiées, mais leur extraction et leur analyse détaillée n'ont pas été réalisées dans le cadre de cette étude.

Un changement de chemin BGP prouverait une modification du routage, mais ne donnerait pas à lui seul le débit transporté.

B. Volumes de trafic

Il faudrait disposer de séries comparables avant, pendant et après l'incident pour :

• les volumes entrants et sortants ;

• les flux internationaux ;

• les volumes transportés par les itinéraires alternatifs ;

• les pertes de trafic ;

• les délais de rétablissement.

C. Capacités alternatives

Il faudrait connaître :

• la capacité nominale et réellement disponible des routes de substitution ;

• le taux d'utilisation pendant l'incident ;

• les congestions ;

• les capacités mobilisées par les opérateurs ;

• les volumes réellement préservés grâce aux adaptations.

D. Dépendances terrestres du Rwanda

Une cartographie détaillée des itinéraires, opérateurs de transit, points de passage et dépendances communes est nécessaire pour mesurer son exposition.

9. Résultats scientifiques et portée pour IFH-TEC

Cette étude apporte plusieurs résultats empiriques utiles.

Résultat 1 — La structure de dépendance compte

La Tanzanie et le Kenya ont subi une perturbation commune, mais les conséquences observées ont été très différentes.

Le nombre de câbles, leur indépendance, les capacités de substitution et l'organisation des réseaux contribuent à expliquer ces différences.

Résultat 2 — Une redondance nominale ne garantit pas une continuité efficace

La Tanzanie disposait de routes alternatives, mais celles-ci ont rapidement été congestionnées.

La simple existence d'une solution alternative ne suffit donc pas à démontrer une adaptation efficace.

Résultat 3 — L'interconnexion locale constitue un facteur important

Les échanges locaux et les infrastructures de mise en cache contribuent à préserver certains services même lorsque les liaisons internationales sont perturbées.

La continuité d'Internet ne dépend donc pas uniquement du nombre de câbles sous-marins.

Résultat 4 — Les dépendances indirectes doivent être intégrées

Le cas du Rwanda démontre qu'un pays sans raccordement direct à un câble sous-marin peut rester fortement exposé à une perturbation de ces infrastructures.

La mesure de l'exposition doit donc porter sur les dépendances fonctionnelles réelles, et non uniquement sur la localisation physique des câbles.

Résultat 5 — La séparation entre vulnérabilité et adaptation est pertinente

L'étude confirme l'intérêt de distinguer :

• la dépendance structurelle ;

• l'exposition au scénario ;

• la concentration et le déficit de redondance ;

• l'efficacité réelle de l'adaptation.

Cette séparation évite notamment de confondre la continuité observée avec la capacité préservée grâce à une réponse adaptative.

10. Niveau de validation atteint

L'évaluation de cette application exploratoire est la suivante :

| Niveau | État |
| --- | --- |
| Niveau 1 — Cohérence des définitions et calculs | |

Partiellement atteint pour les proxys

Niveau 2 — Confrontation aux observations empiriques

Atteint qualitativement

Niveau 3 — Mesure documentée des quatre composantes

Non atteint

Niveau 4 — Comparaison diagnostique à des modèles de référence

Non réalisée

Niveau 5 — Tests prédictifs indépendants

Non réalisés

Il ne faut donc pas présenter cette étude comme une validation complète de V(t).

Elle constitue une application empirique exploratoire qui permet de confronter les définitions du modèle à des observations réelles, de construire des indicateurs indirects et d'identifier les données nécessaires à une validation supérieure.

11. Conclusion générale

L'étude des coupures simultanées de SEACOM et EASSy du 12 mai 2024 met en évidence des différences significatives de vulnérabilité entre la Tanzanie, le Kenya et le Rwanda.

La Tanzanie présente les impacts observés les plus importants et l'indice structurel exploratoire le plus élevé parmi les deux pays pour lesquels le calcul complet des trois proxys est possible : 70,93/100.

Le Kenya présente un indice structurel exploratoire de 45,00/100 et des signes de meilleure continuité grâce à ses possibilités de redondance.

Le Rwanda présente une dépendance importante à des infrastructures extérieures et à des liaisons terrestres transfrontalières. Son exposition ne peut cependant pas être quantifiée avec les indicateurs disponibles.

Les résultats soutiennent qualitativement l'intérêt de la méthode V(t), mais ne permettent pas encore de produire trois scores complets et suffisamment fiables.

La principale difficulté n'est plus la construction mathématique de la formule : elle réside dans la disponibilité, l'accès et l'exploitation des données brutes nécessaires à la mesure des variables.

Cette difficulté ne doit pas être interprétée comme une absence de phénomène, mais comme une limite de connaissance et de mesure.

Le résultat scientifique à retenir est donc le suivant : la méthode V(t) a été appliquée à un cas empirique réel, des proxys structurels ont été calculés, des adaptations ont été observées et les limites de mesure ont été explicitement identifiées. La validation quantitative complète reste ouverte.

———

## 12. Références documentaires principales


1. Internet Society — rapport sur les perturbations des câbles sous-marins en Afrique de l'Est en mai 2024, les dépendances régionales, les IXP, l'hébergement et les adaptations des opérateurs.

2. IODA — observations de connectivité et rapports d'incidents des 12–14 mai 2024.

3. NetBlocks — observations de connectivité pendant les perturbations de mai 2024, notamment les valeurs reprises dans le rapport de Recorded Future.

4. Recorded Future — rapport publié le 17 juillet 2025 reproduisant les observations NetBlocks.

5. RIPE NCC — documentation de BGPlay et des archives RIPE RIS.

6. RouteViews — documentation des archives MRT et des données historiques BGP.

7. Cloudflare Radar — documentation des séries historiques de trafic et de l'API.


Statut documentaire : les sources et les observations ont été identifiées dans le cadre de la recherche. Les archives BGP et les séries brutes de trafic n'ont pas été intégralement extraites ni recalculées dans cette étude.