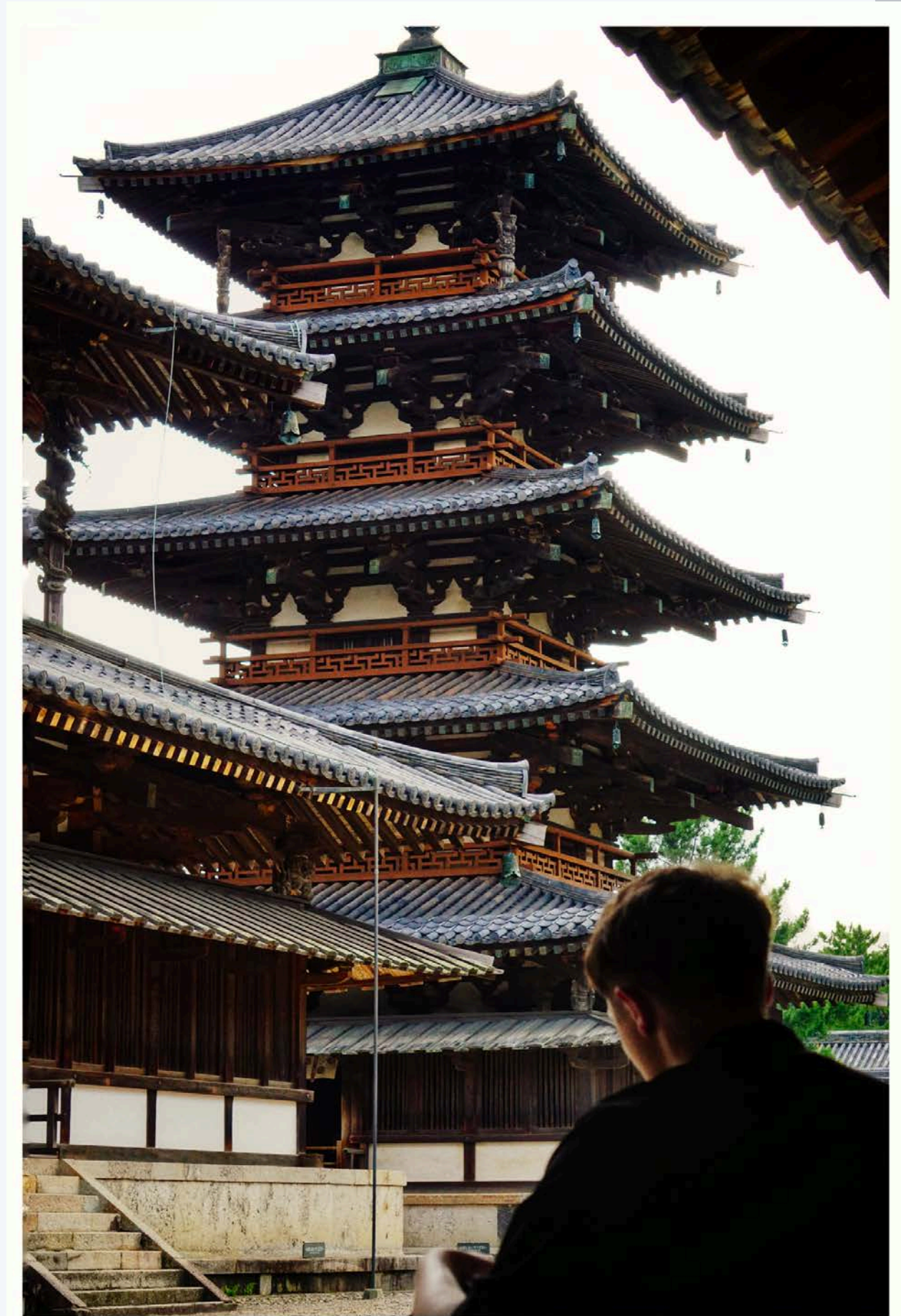


# JAPANESE PAGODA

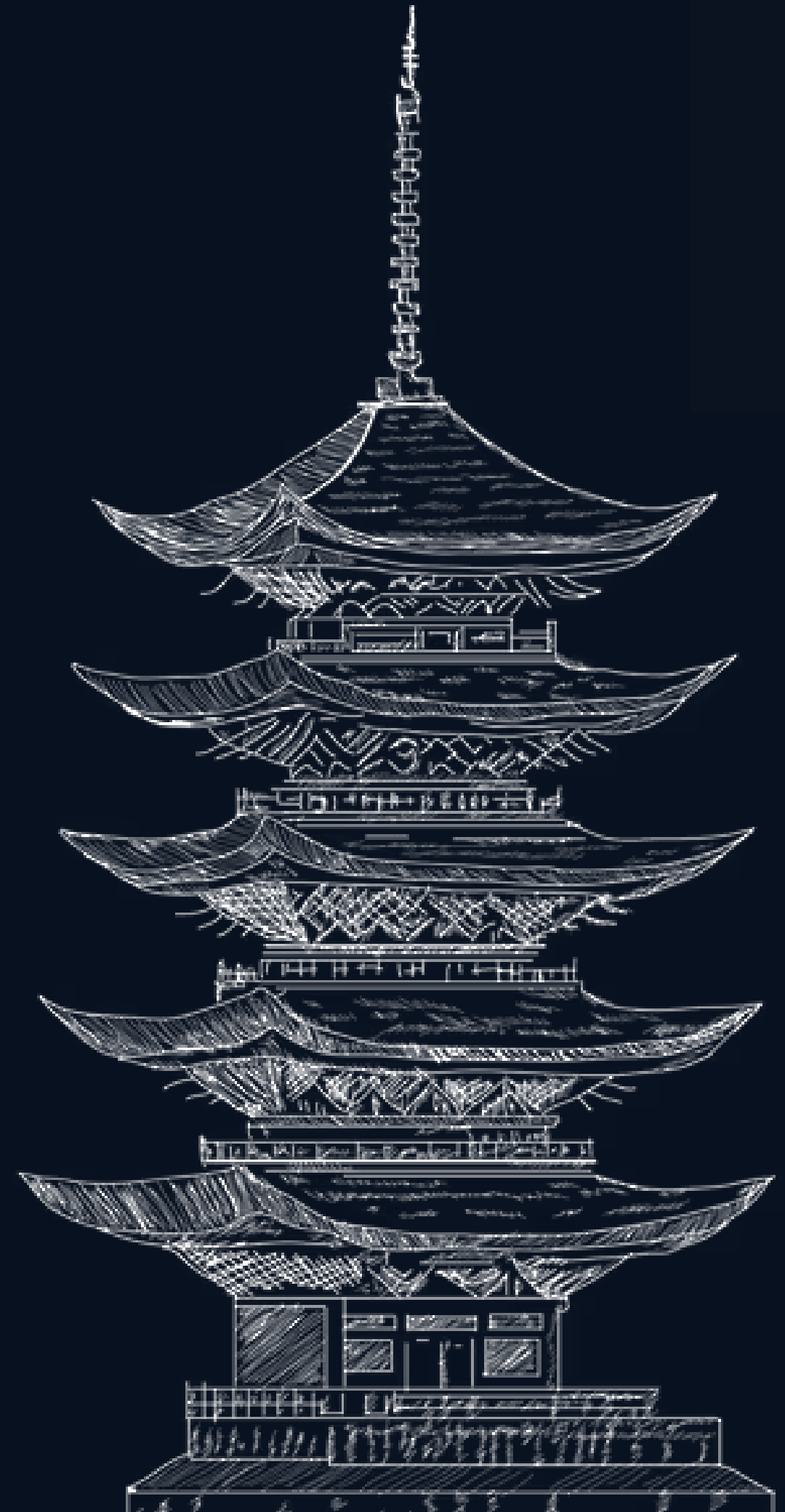
## A **LIVING** ARCHITECTURE OF A **VULNERABLE** LAND

NASEEM AIT KHELIFA



# INTRODUCTION

1



# L'IRIDES



## Création de l'IRIDeS

Créé en Avril 2012 suite au **Grand Séisme de Tohoku** du 11 mars 2011  
Intégré au sein de l'université de Tohoku a **Sendai**

## Mission

Institut **interdisciplinaire** pour développer des stratégies de sociétés **résilientes** et durables face aux catastrophes

## Earthquake engineering lab

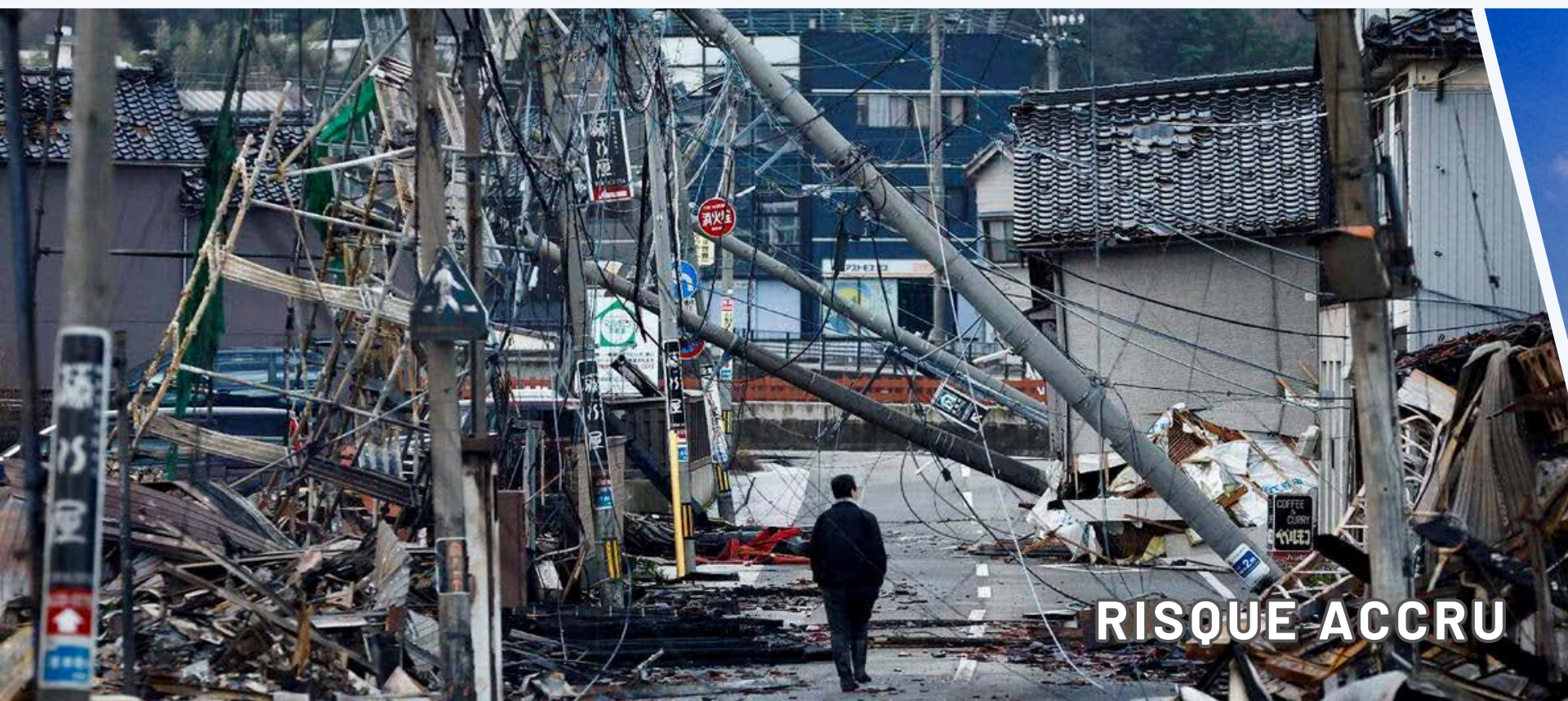
Laboratoire du Pr Kohju IKAGO  
Développe des systèmes de **protection** sismique



## UN PARADOXE FRAPPANT

Un contexte particulièrement exposé et pourtant un patrimoine en bois riche et millénaire...

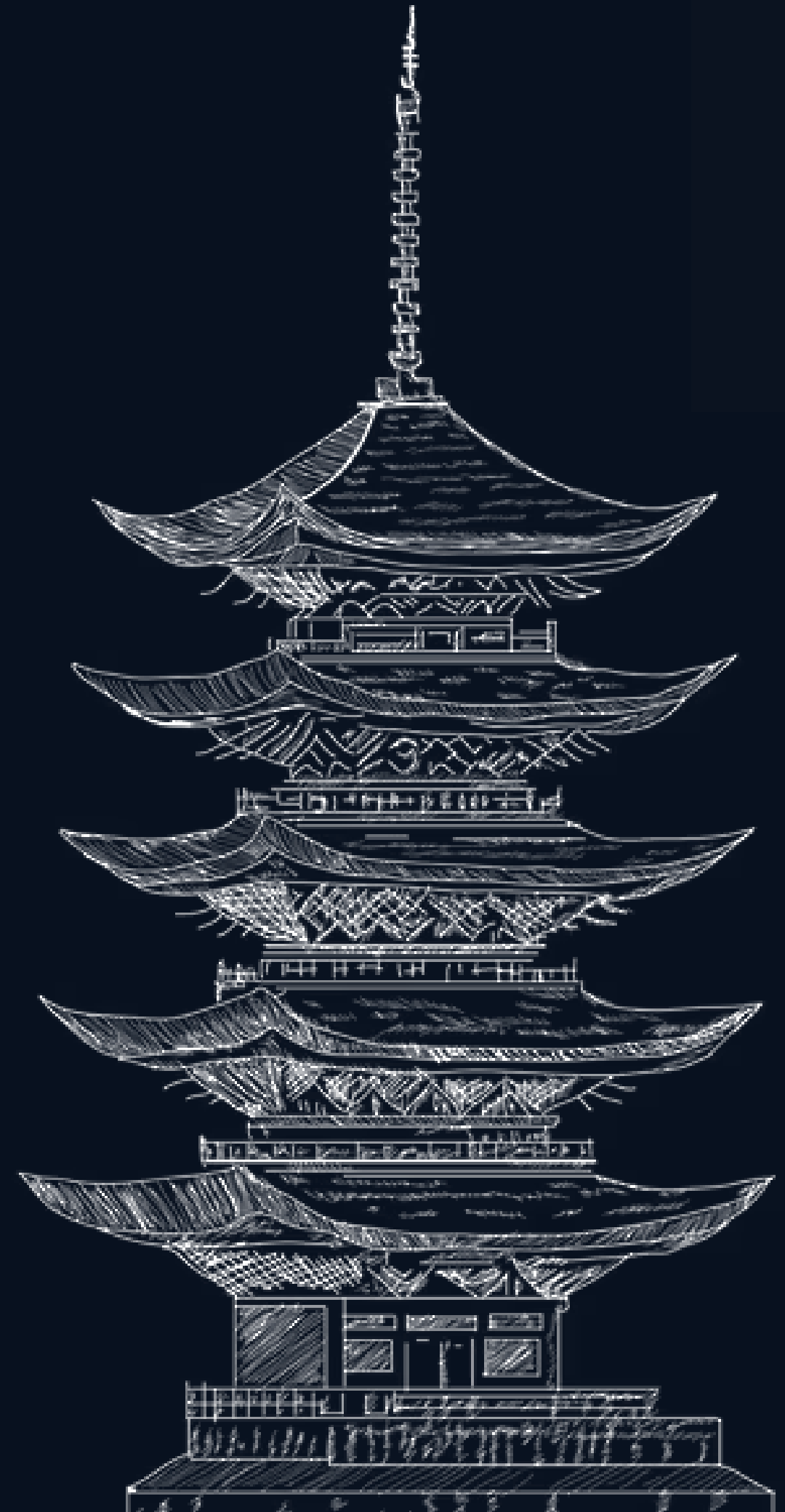
**Dans quelle mesure la pagode japonaise incarne un patrimoine culturel et symbolique d'une architecture parasismique résiliente ?**



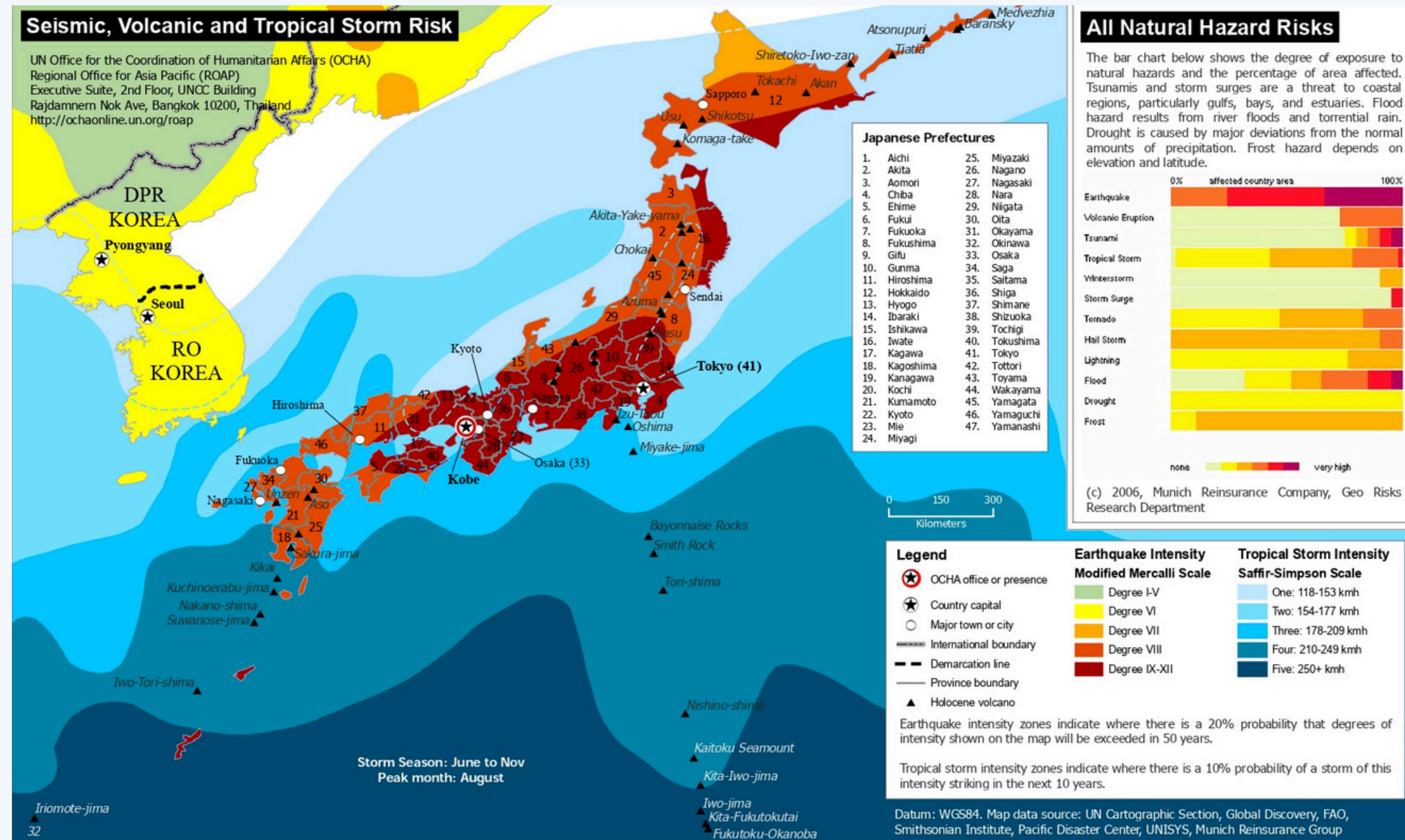
**PATRIMOINE MILÉNAIRE**

# CONTEXTE

2



# LE JAPON : UNE TERRE A RISQUE



CHAQUE ANNÉE  
**1000**  
SÉISMES MW>4

PAR AN  
**26**  
TYPHONS

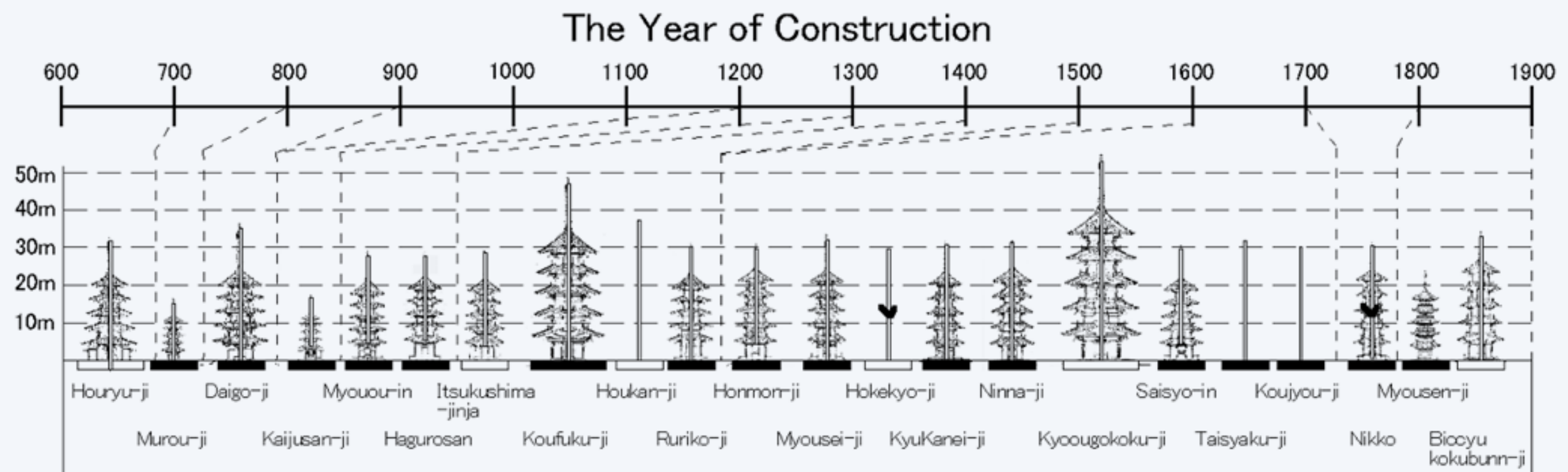
AU JAPON  
**10%**  
DES VOLCANS  
ACTIFS MONDIAUX

Le Japon est exposé a de nombreux aléas

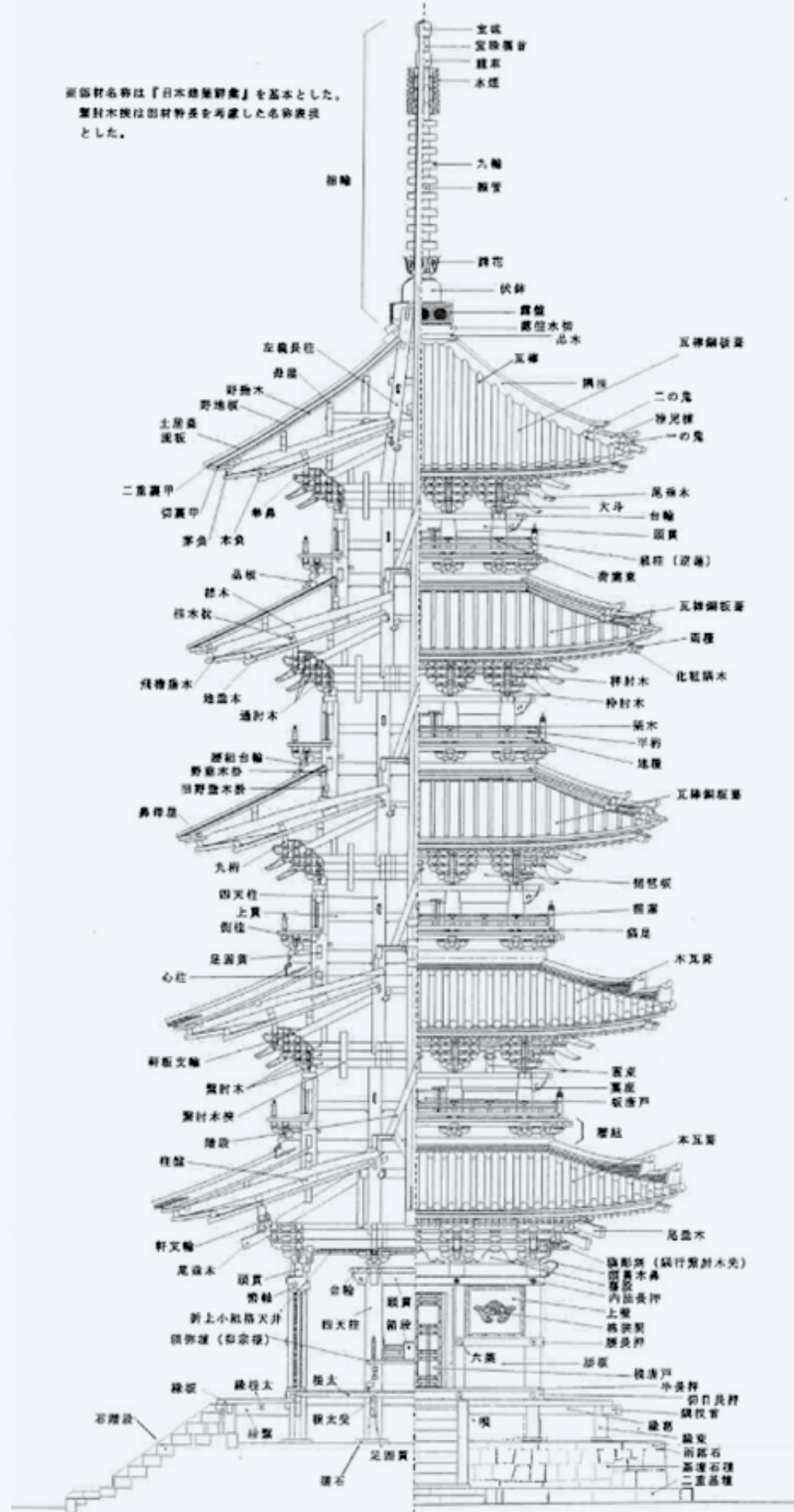
# LA PAGODE COMME PATRIMOINE RELIGIEUX ET HISTORIQUE

## GÉNÉRALITÉS

Près de 80 pagodes japonaise à 5 étages dont 22 subsistent d'avant l'ère Meiji  
 105 pagodes à 3 étages sur cette même période



# LA PAGODE COMME PATRIMOINE RELIGIEUX ET HISTORIQUE



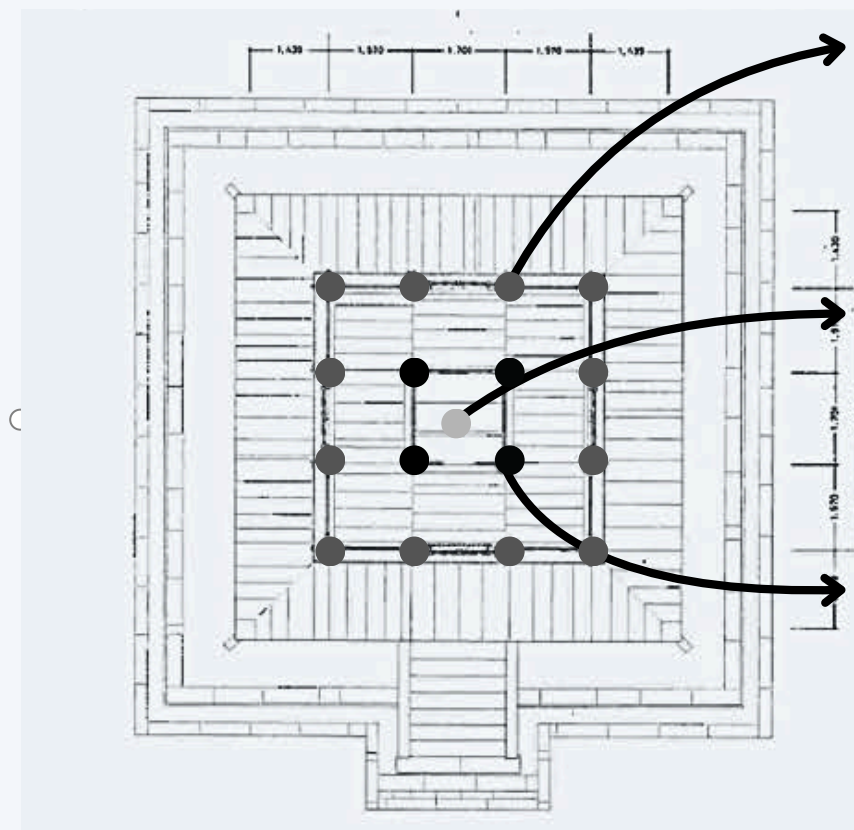
## UNE ARCHITECTURE STABLE

Plan symétrique

Bâtiment de **plain pied** en forme de tour à **5 "étages"**

Avant-toits profonds caractéristiques

Une conception en bois **sophistiquée**



Gawabashira

Shinbashira

Shitenbashira

# LA PAGODE COMME PATRIMOINE RELIGIEUX ET HISTORIQUE



## UNE VALEUR CULTURELLE

La pagode devient rapidement un symbole de prestige  
Certaines sont construites hors des temples  
Encore aujourd'hui elles incarnent l'essence japonaise

## LE MYTHE DE L'INVINCIBILITÉ

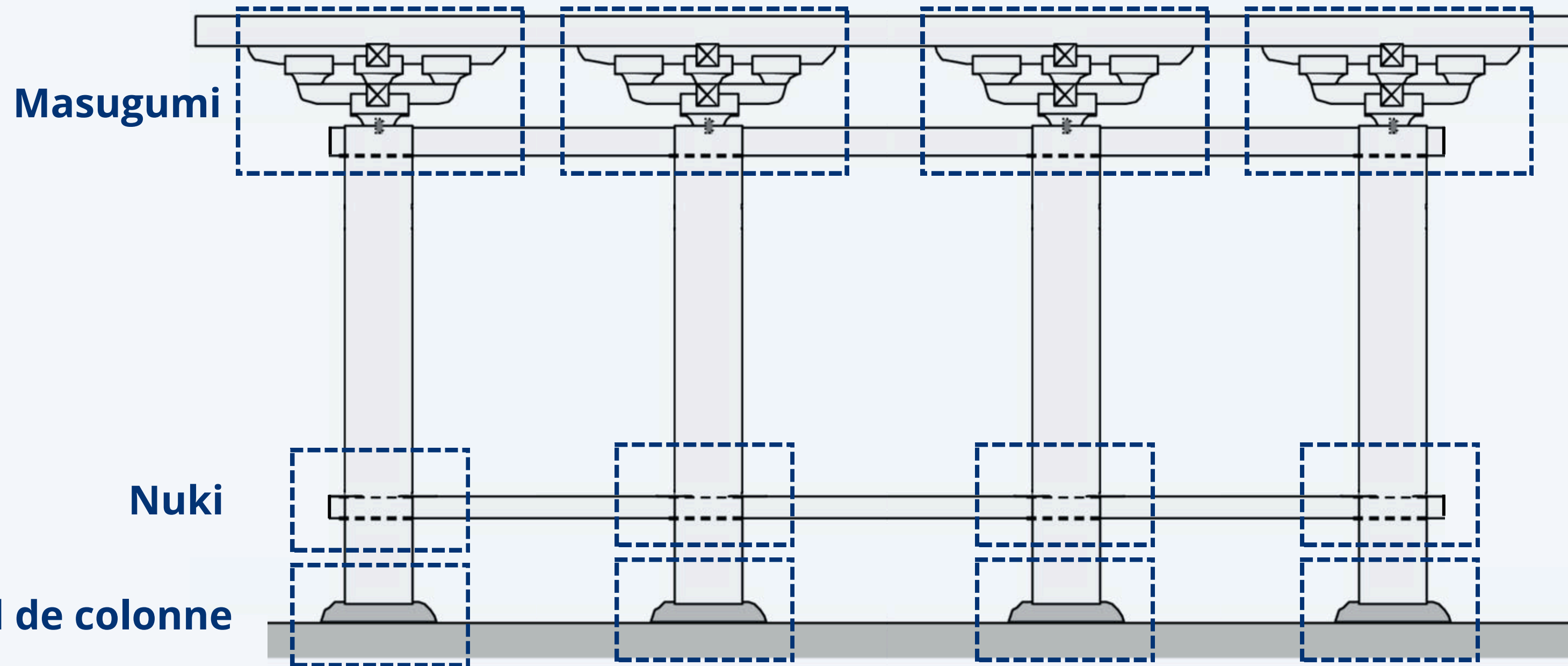
Aucune trace de pagode détruite par un séisme  
La pagode devient un marqueur de dégât  
Fréquemment cité lors de la controverse entre rigidité et flexibilité

# COMPRENDRE LE COMPORTEMENT SISMIQUE DE LA PAGODE

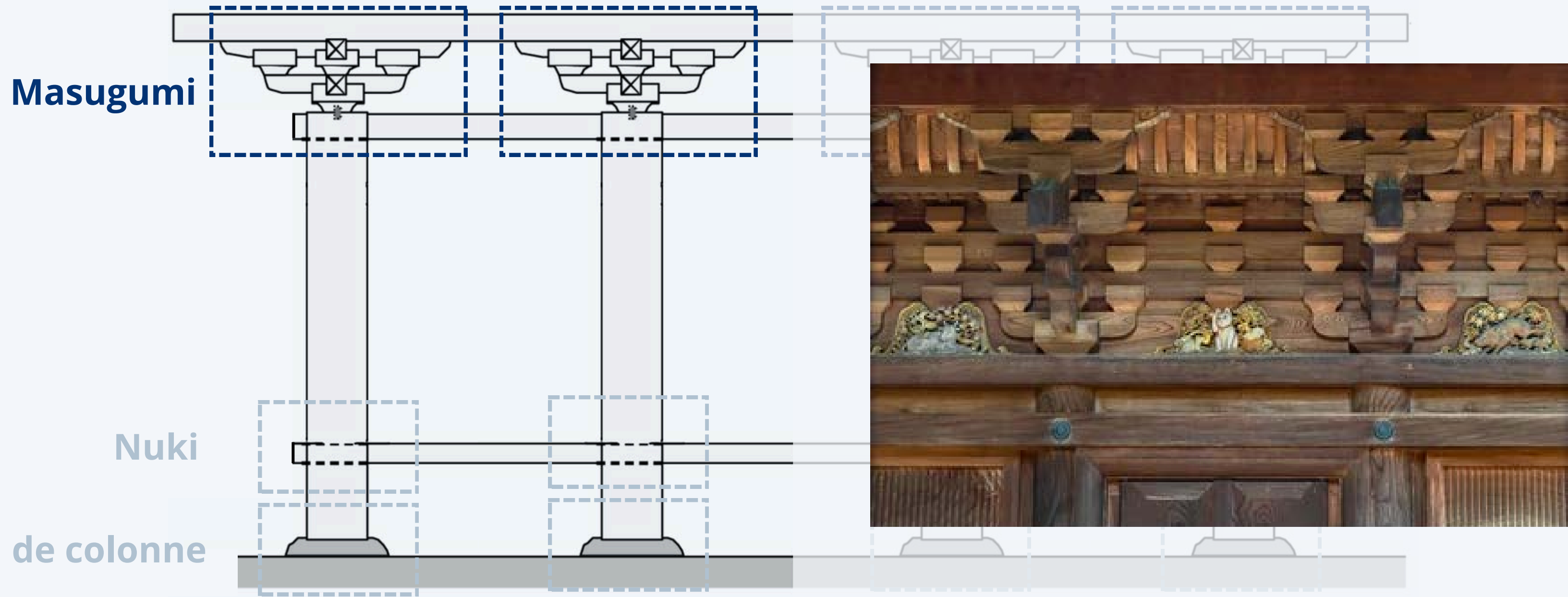
3



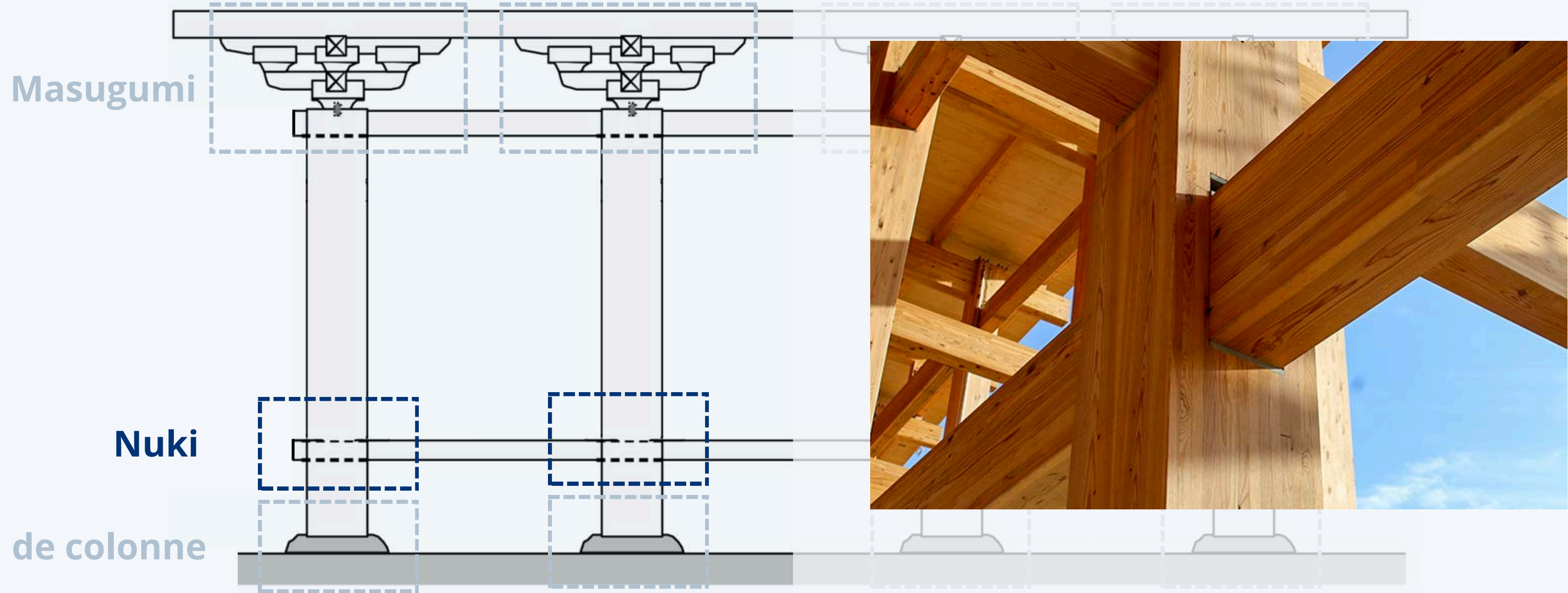
# LES ASSEMBLAGES



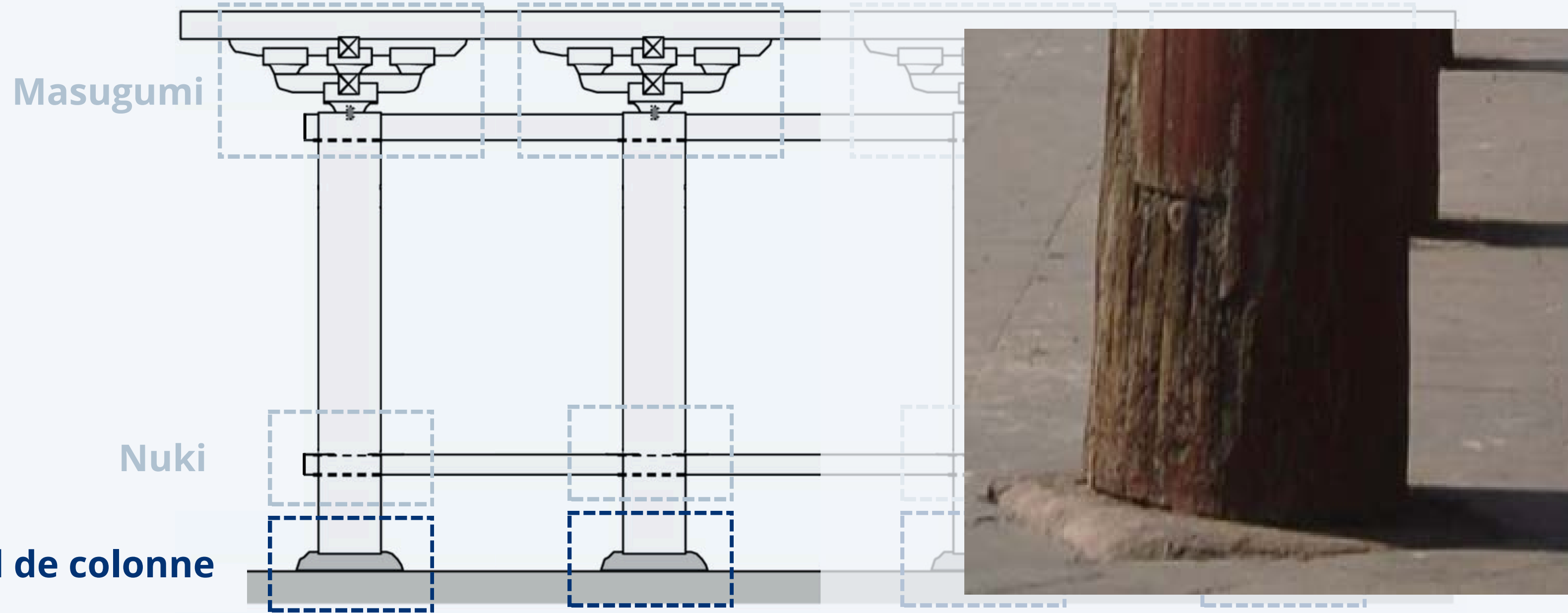
# LES ASSEMBLAGES



# LES ASSEMBLAGES

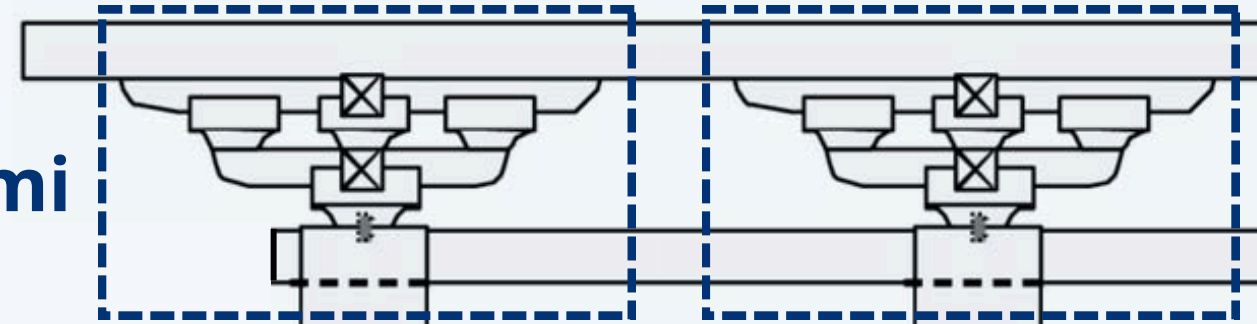


# LES ASSEMBLAGES

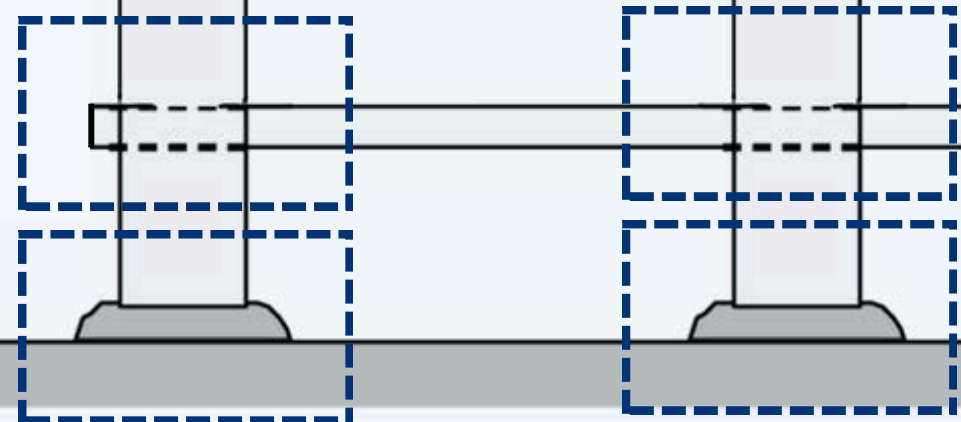


# LES ASSEMBLAGES

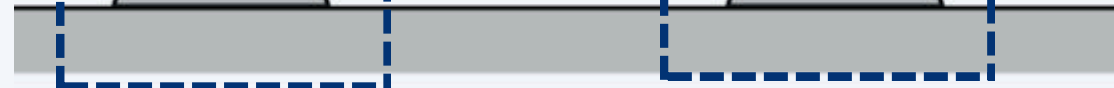
Masugumi



Nuki



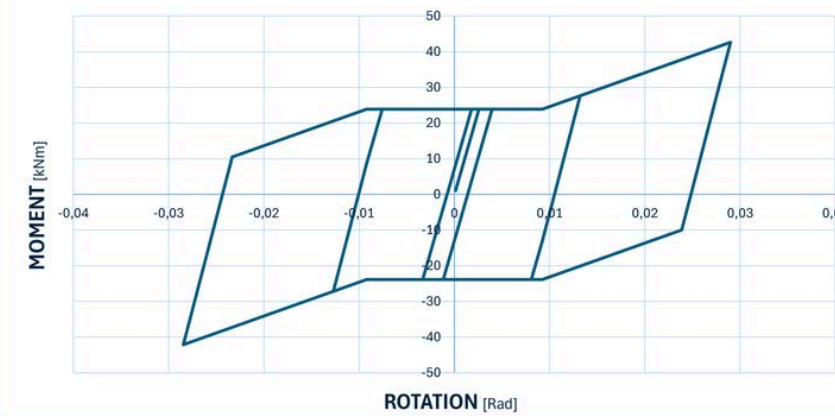
Pied de colonne



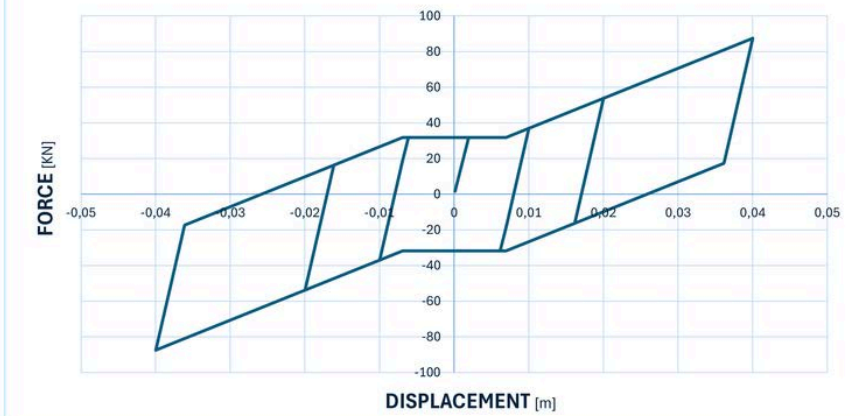
## ROTATION

## TRANSLATION

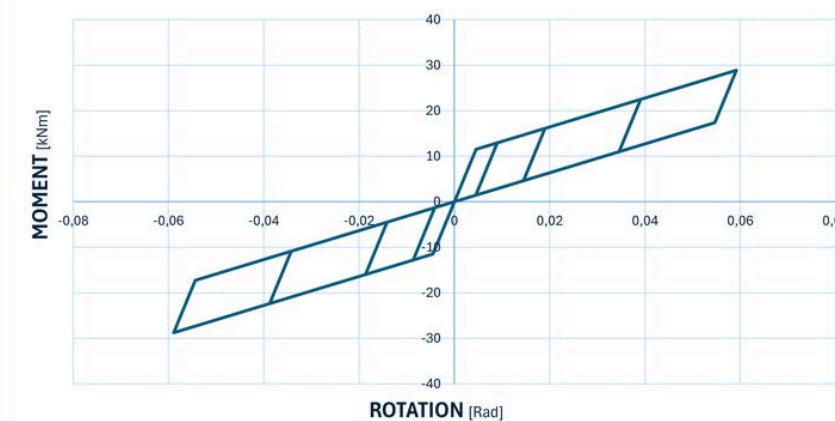
MASUGUMI



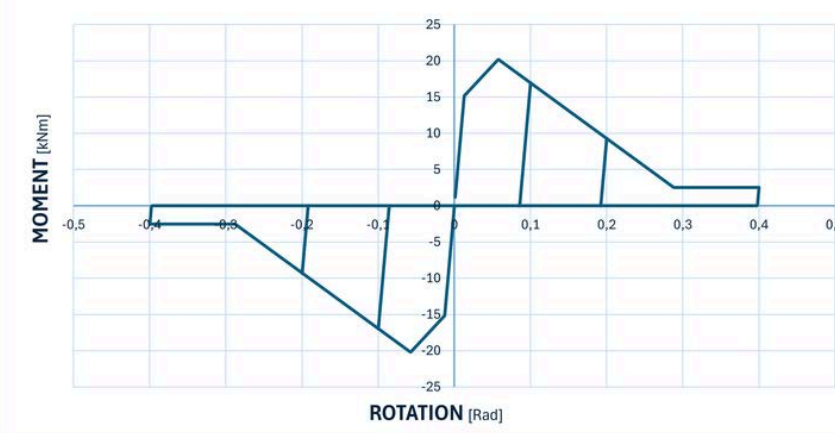
MASUGUMI



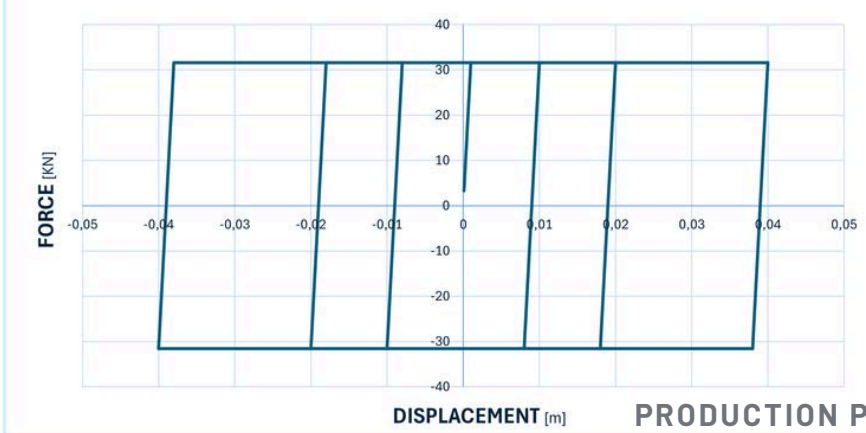
NUKI BEAM



FOOT COLUMN



FOOT COLUMN



**CALCUL DES LOIS DE  
COMPORTEMENT AVEC UNE  
ÉTUDE DE L'ÉTAT DE L'ART**

# MODÉLISATION ET LIMITES

## SIMPLIFICATION 2D

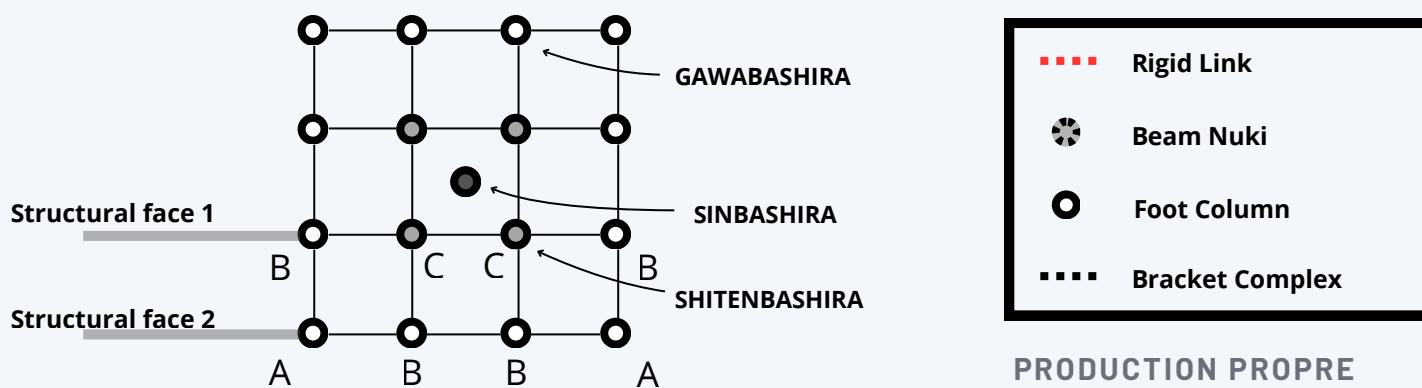
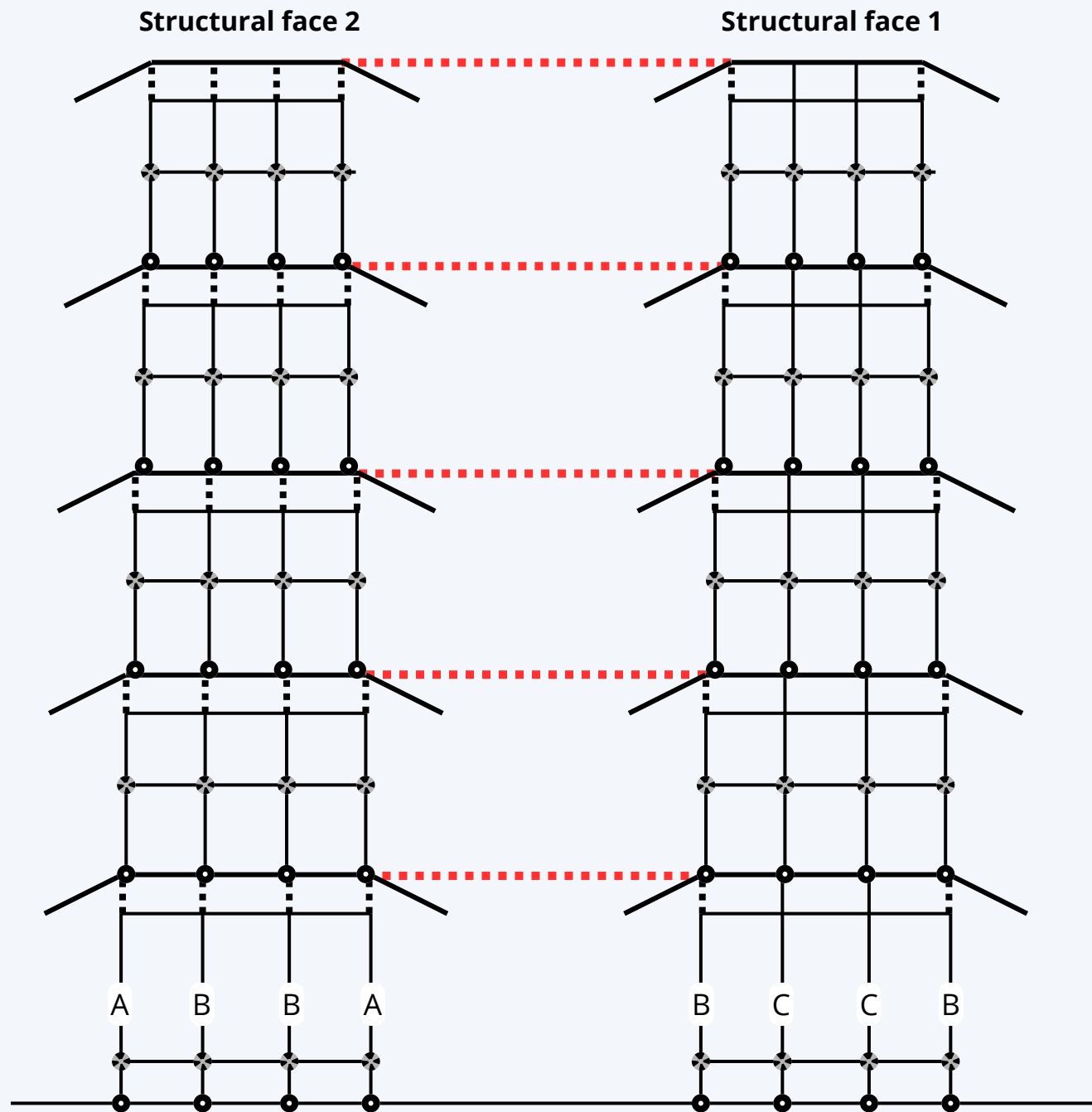
L'étude suppose que la rigidité entre les "faces" est assez importante pour faire un simplification en 2D  
 Pas de prise en comptes de la torsion et autres phénomènes 3D

## MODÈLE SIMPLIFIÉ DE LA STRUCTURE BOIS

Le modèle ne prend pas en compte les éléments non structuraux et simplifie les 18000 éléments en bois  
 Pas de modélisation ni des murs en terre entre les colonnes ni du Shinbashira

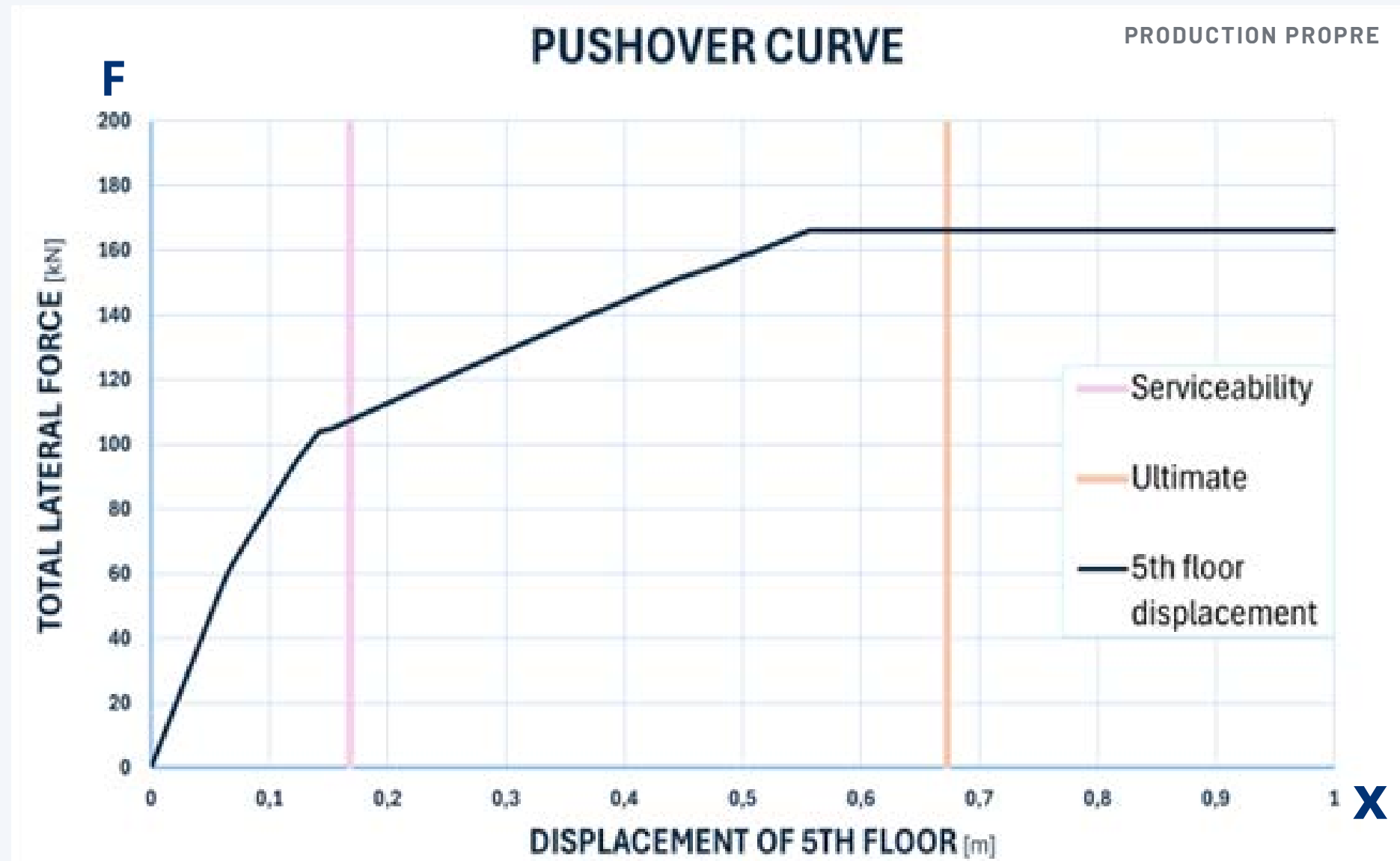
## RÉPARTITION DES MASSES

Aucune données précises sur la répartition de la masse.  
 Hypothèse de 120T pour la structure répartie en fonction de la géométrie et des éléments



# ANALYSE PUSHOVER

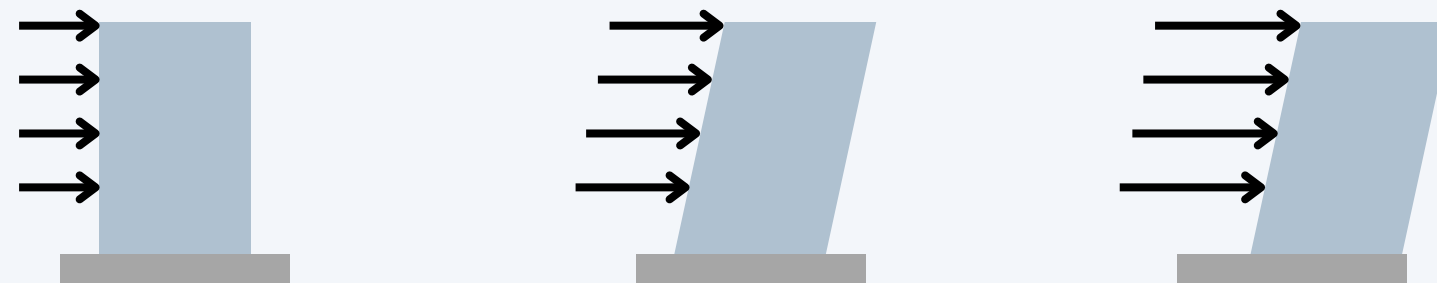
# ANALYSE CRITIQUE DES PERFORMANCES SIMULÉES



Répartition uniforme des charges latérales du PushOver

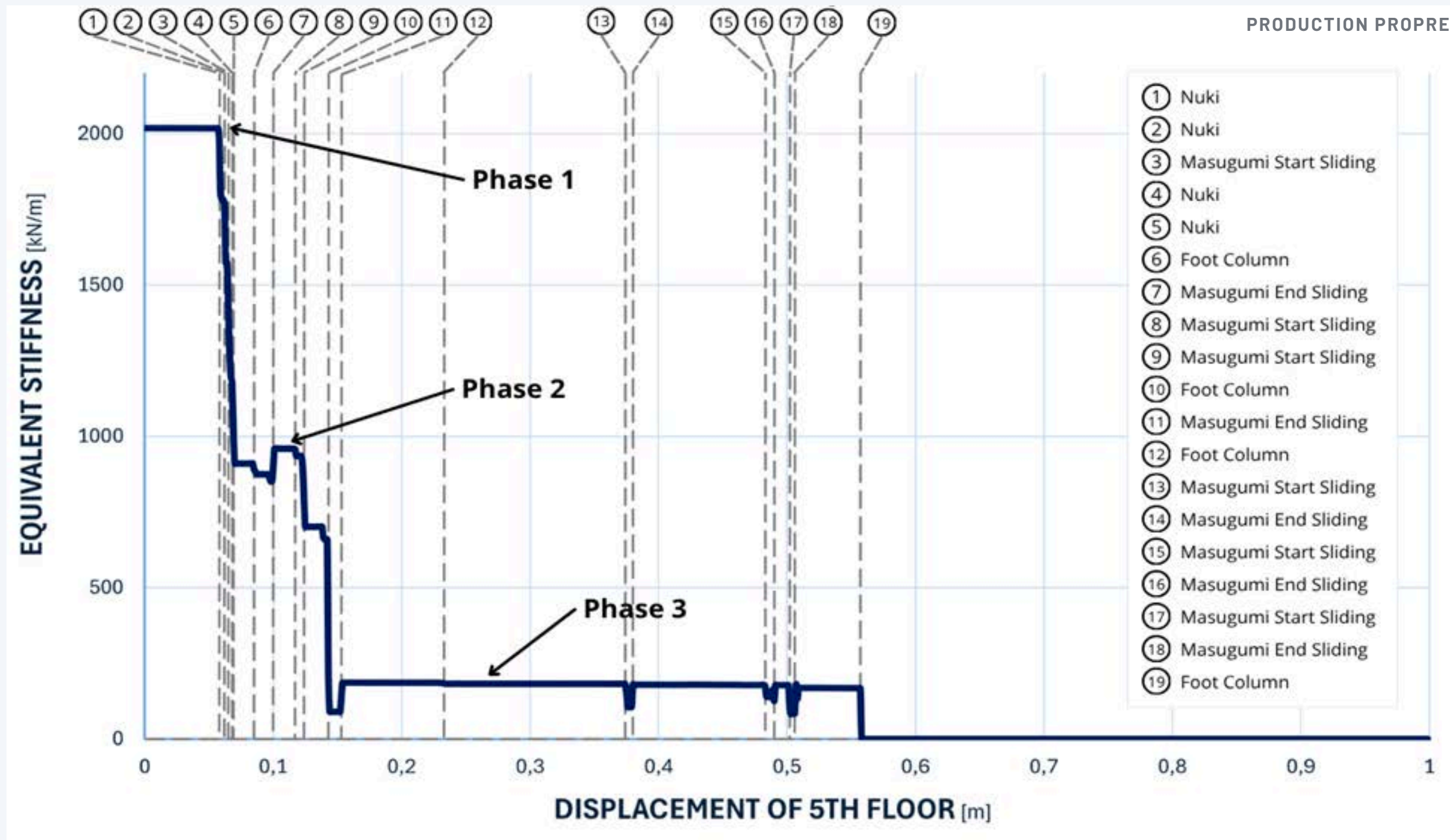
Glissement global de la structure pour une inclinaison totale de 1/35 rad

Comportement non linéaire

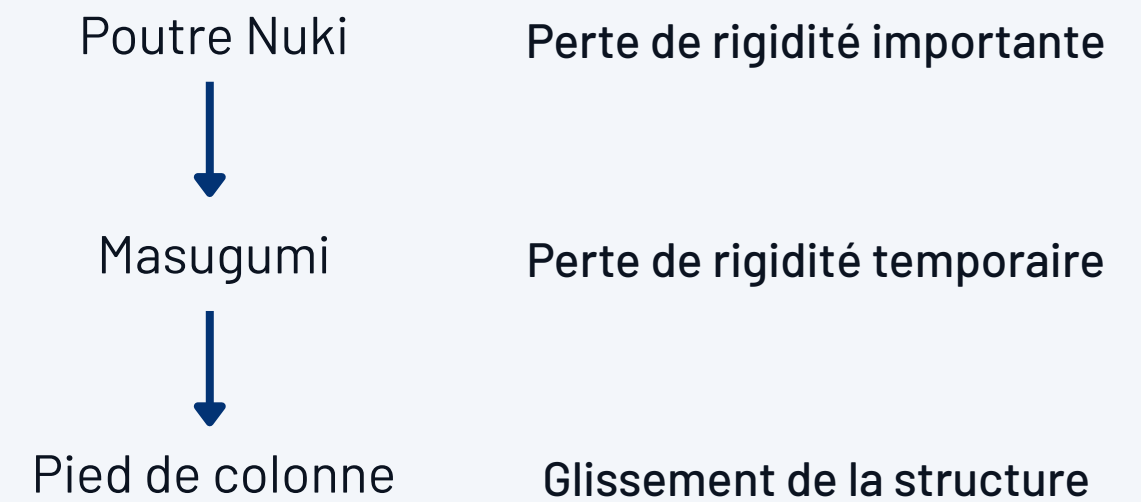


# ANALYSE CRITIQUE DES PERFORMANCES SIMULÉES

## ANALYSE PUSHOVER



### Séquence de non linéarité

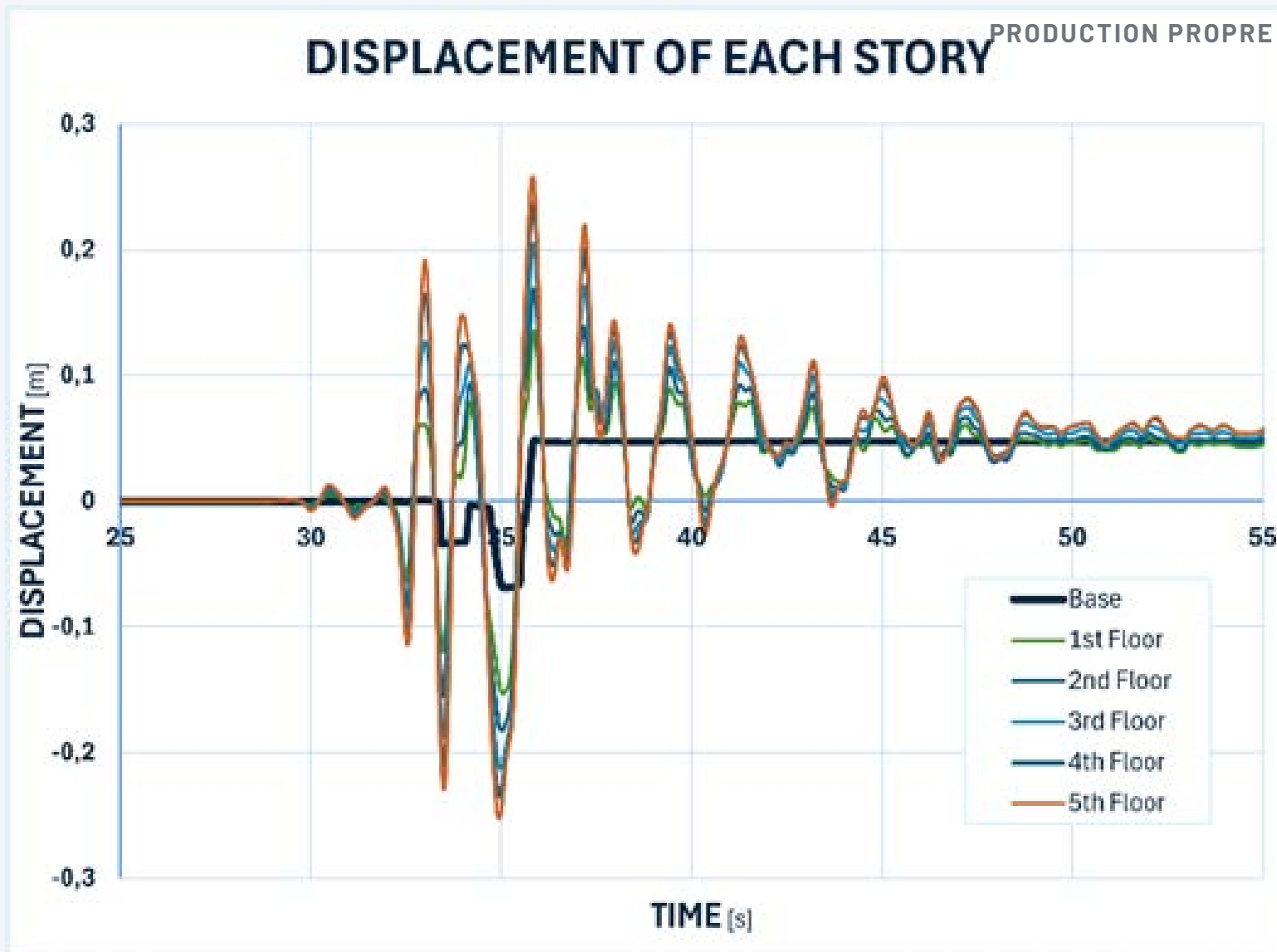


### Allongement de la période propre

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Mode 1	1,468	1,872	3,852
Mode 2	0,514	0,595	0,69
Mode 3	0,298	0,323	0,376

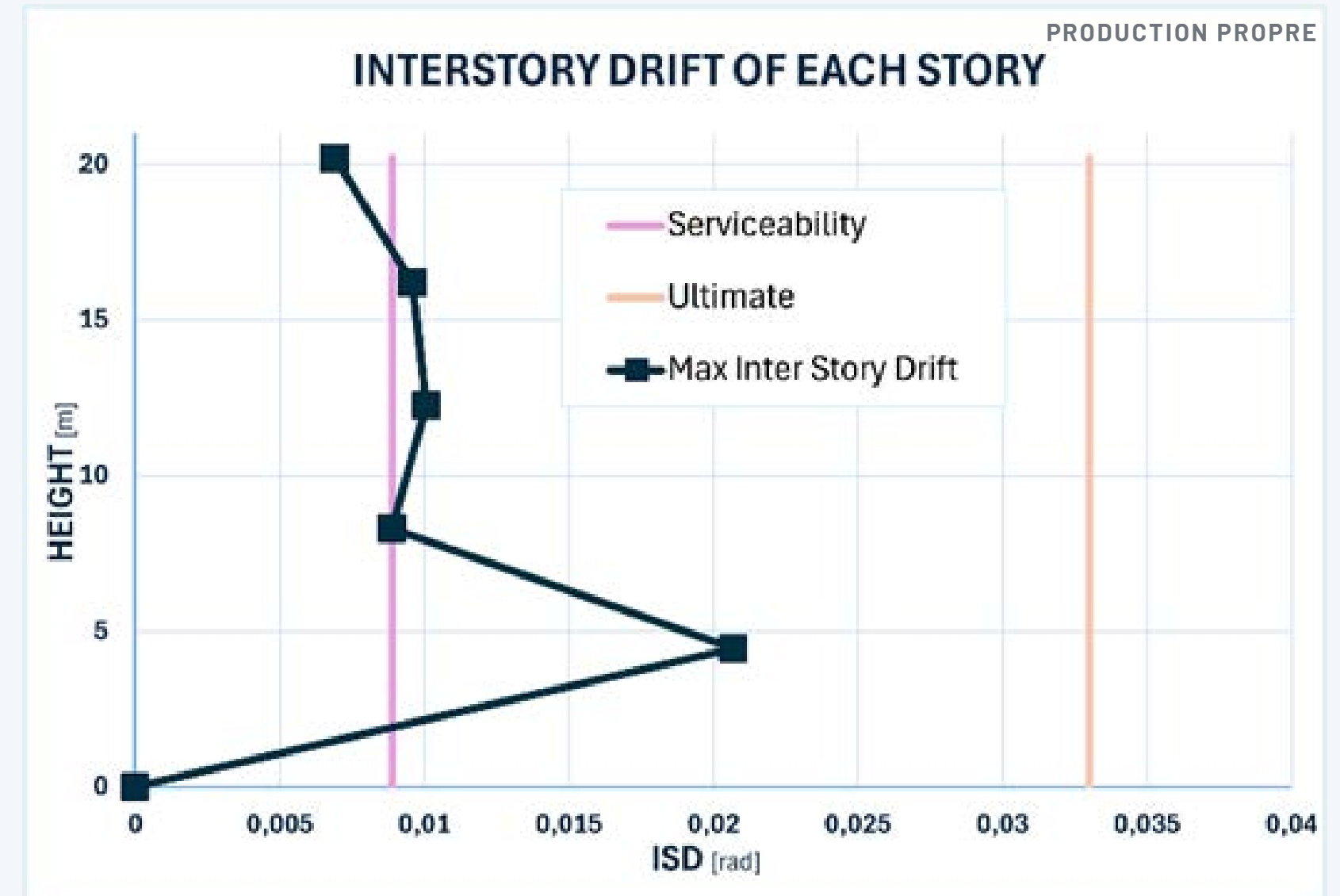
# ANALYSE DYNAMIQUE

# ANALYSE CRITIQUE DES PERFORMANCES SIMULÉES



**Déplacement résiduel**

La structure entière s'est déplacée de 4,7cm a la fin de l'excitation



**Déplacement relatif inter-étage**

C'est le premier étage qui enregistre les déformations maximales

## ANALYSE DYNAMIQUE

# ANALYSE CRITIQUE DES PERFORMANCES SIMULÉES

ÉNERGIE DISSIPÉE PAR ASSEMBLAGE PAR ÉTAGE							PRODUCTION PROPRE
	1 <sup>st</sup> Floor	2 <sup>nd</sup> Floor	3 <sup>rd</sup> Floor	4 <sup>th</sup> Floor	5 <sup>th</sup> Floor	Total	<i>Pourcentage</i>
<i>Units</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	
<b>Foot column</b>	16820	1030	1580	520	320	<b>20280</b>	41%
<b>Nuki</b>	3930	110	190	70	0	<b>4300</b>	9%
<b>Masugumi</b>	15090	1590	3290	2900	1650	<b>24530</b>	50%
<b>Total</b>	<b>35840</b>	<b>2740</b>	<b>5060</b>	<b>3490</b>	<b>1970</b>	<b>49100</b>	
<b><i>Pourcentage</i></b>	73%	6%	10%	7%	4%		

### Le 1er étage permet de dissiper le plus d'énergie

Il faut cependant mettre cela en perspective avec le risque de déplacement trop important de cet étage

### Les Masugumi permettent une dissipation d'énergie importante

Malgré que leur non linéarité soit la dernière à entrer en fonction

# ANALYSE CRITIQUE DES PERFORMANCES SIMULÉES

## CONCLUSION

### UN SYSTÈME HIÉRARCHISÉ...

Les Nuki assurent une première ligne de défense contre les tremblements de terre fréquents et modérés

Les Masugumi constituent un mécanisme de dissipation majeur lors d'événements sévères

Le glissement des poteaux limite les forces transmises

Le tout constitue un système auto adaptatif prévenant de la résonance

### ...QUI RAPPELLE LES APPROCHES MODERNES

Les anciens bâtisseurs de pagodes avaient déjà développé une compréhension intuitive de ces mêmes mécanismes

À bien des égards, la sagesse de ces constructions ancestrales a anticipé les principes mêmes qui définissent aujourd'hui la conception parasismique moderne.

### APPROCHES MODERNES

**RIGIDITÉ**  
耐震構造  
Taishin

**ISOLATION**  
免震構造  
Menshin

**AMORTISSEMENT**  
制震構造  
Seishin

# UN COMPORTEMENT FRAGILE DANS UN ENVIRONNEMENT EXIGEANT

**ACTIVITÉ SISMIQUE RÉPÉTÉE**

**CLIMAT CHAUD ET HUMIDE**

Les résultats montrent de bonnes performances sismiques sur une excitation **unique** à un état **figé dans le temps**

**IL EST NÉCESSAIRE D'ÉTUDIER D'AUTRES TEMPORALITÉS, EN PARTICULIER DANS LE CONTEXTE JAPONAIS**

# UN COMPORTEMENT FRAGILE DANS UN ENVIRONNEMENT EXIGEANT

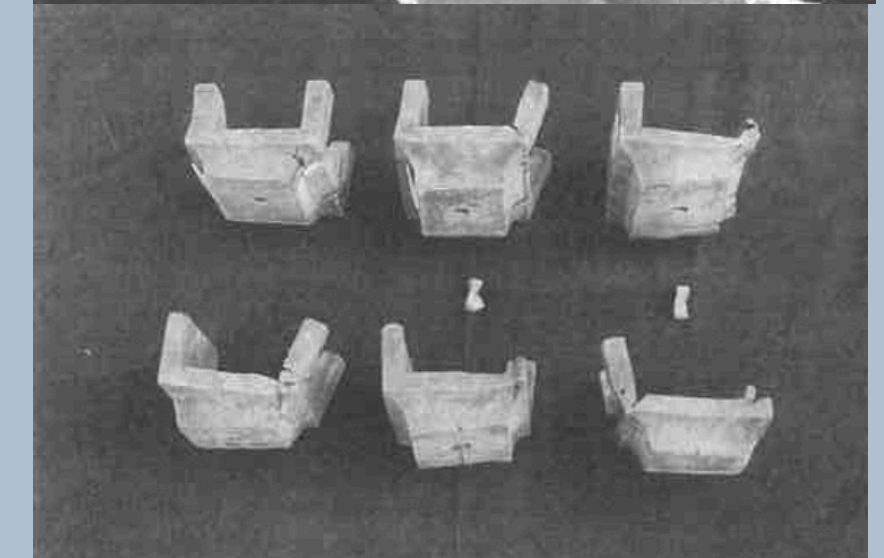
**ACTIVITÉ SISMIQUE RÉPÉTÉE**

**CLIMAT CHAUD ET HUMIDE**

Accumulation de déformations plastiques

Une expérience sur maquette a montré une augmentation de 10% de la période propre après un épisode sismique

Les surfaces entre éléments peuvent se lisser avec la répétition des mouvements



# UN COMPORTEMENT FRAGILE DANS UN ENVIRONNEMENT EXIGEANT

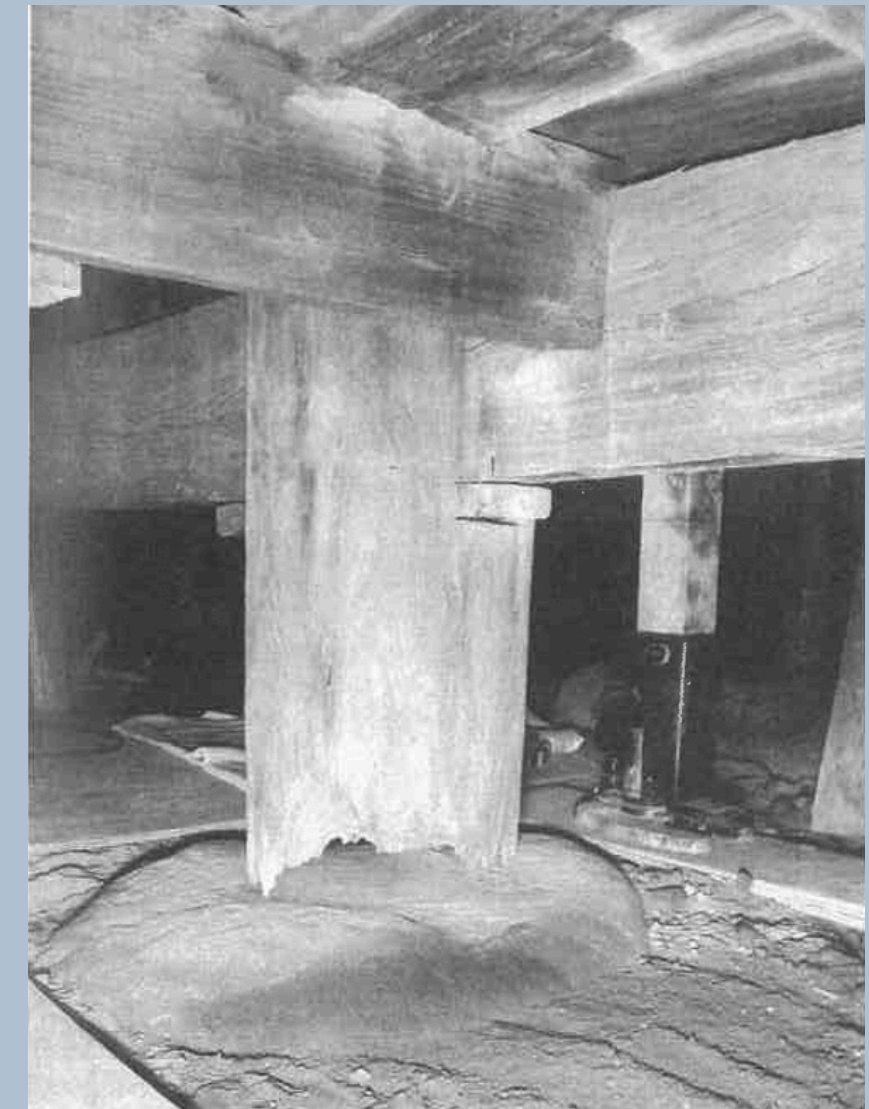
**ACTIVITÉ SISMIQUE RÉPÉTÉE**

**CLIMAT CHAUD ET HUMIDE**

La présence d'humidité et une température suffisante provoque l'apparition de pourriture

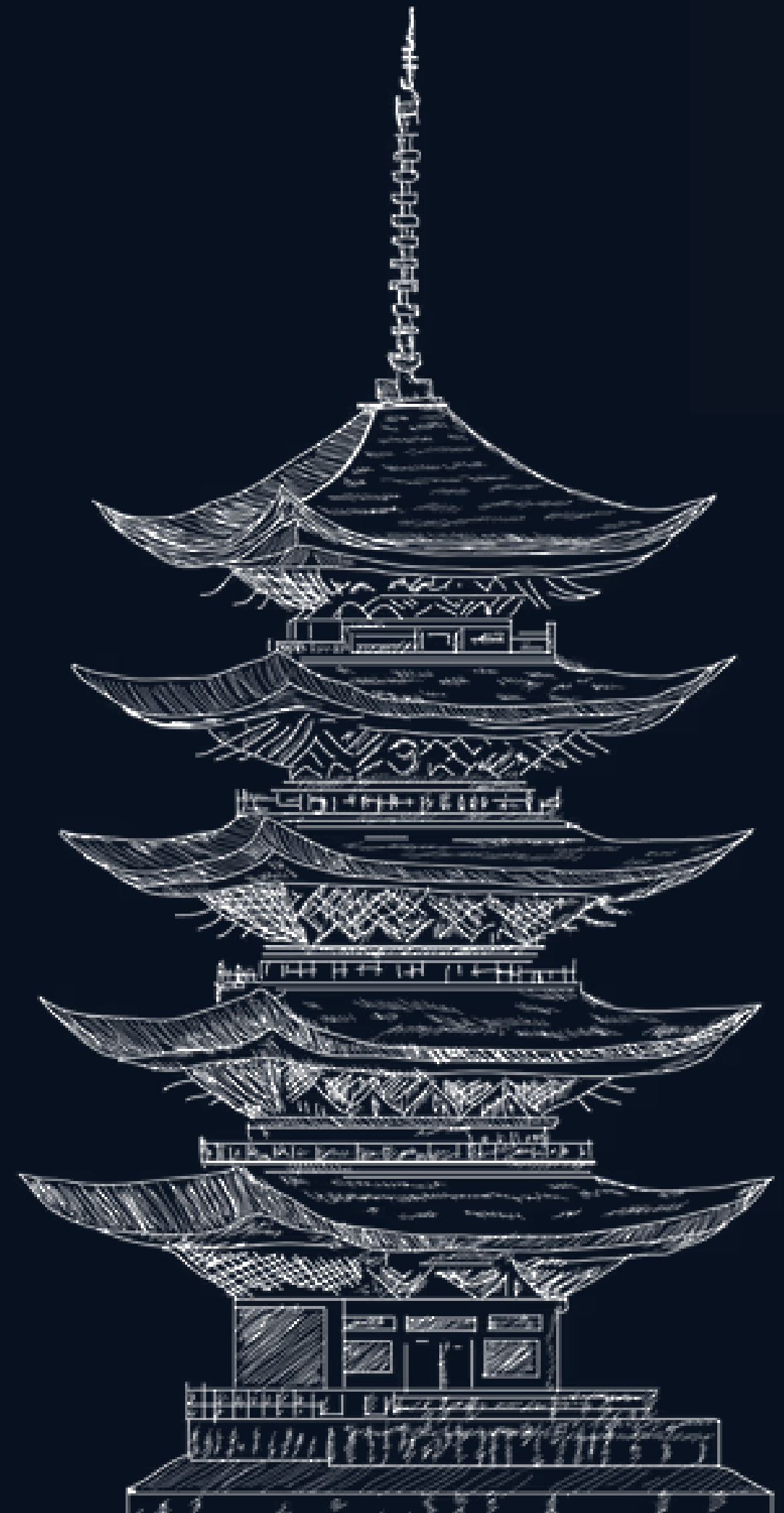
Les assemblages sont particulièrement visés

Une augmentation du jeu entre les éléments peut réduire la rigidité initiale et modifier la répartition de charge



# LA RESTORATION COMME PATRIMOINE IMMATERIEL

4



# LE KAITAI SHURI COMME TECHNIQUE ANCESTRALE DE RESTORATION



Dans le **climat chaud, humide et pluvieux** du Japon, les bâtiments en **bois** sont particulièrement **vulnérables** aux dommages causés par des **catastrophes naturelles** telles que les typhons et les tremblements de terre. [...] Pour cette raison, la **restauration régulière est essentielle pour préserver et transmettre les édifices du patrimoine culturel aux générations futures.**

Association pour les Techniques de Préservation des Bâtiments du Patrimoine Culturel (財団法人文化財建造物保存技術協会)



Démontage complet



Réparation ou le remplacement de chaque élément jugé défectueux



Réassemblage précis

## DÉFINITION

Kaitai shūri (解体修理), littéralement « démontage et réparation » est une pratique cyclique et active  
Sa périodicité s'étale sur de longs cycles, souvent entre 200 et 300 ans interrompu par des opérations de maintenance plus régulières

# LA RÉSILIENCE PAR LA RESTAURATION

TRANSMISSION

ADAPTATION

COHÉSION SOCIALE

Le kaitai shuri apparaît comme bien plus qu'une simple pratique technique pour renouveler les performances sismiques des pagodes japonaises

**IL S'AGIT D'UNE PRATIQUE PROFONDÉMENT ANCRÉÉ DANS LA CULTURE LOCALE ET UN ACTE DE RÉSILIENCE**

# LA RÉSILIENCE PAR LA RESTAURATION

## TRANSMISSION

Le kaitai shuri devient un canal privilégié pour la transmission du savoir faire traditionnel, couvrant de l'abatage à la mise en œuvre garantissant la continuité des connaissances

Les rapports de restauration modernes obligatoires permettent de conserver l'histoire de chaque pagode

## ADAPTATION

## COHÉSION SOCIALE



# LA RÉSILIENCE PAR LA RESTAURATION

TRANSMISSION

ADAPTATION

COHÉSION SOCIALE



Le Kaitai Shūri a toujours servi de plateforme **d'adaptation** et d'amélioration structurelle, ce qui en fait, encore aujourd'hui, le moment privilégié pour la **mise aux normes** des bâtiments

# LA RÉSILIENCE PAR LA RESTAURATION

TRANSMISSION

ADAPTATION

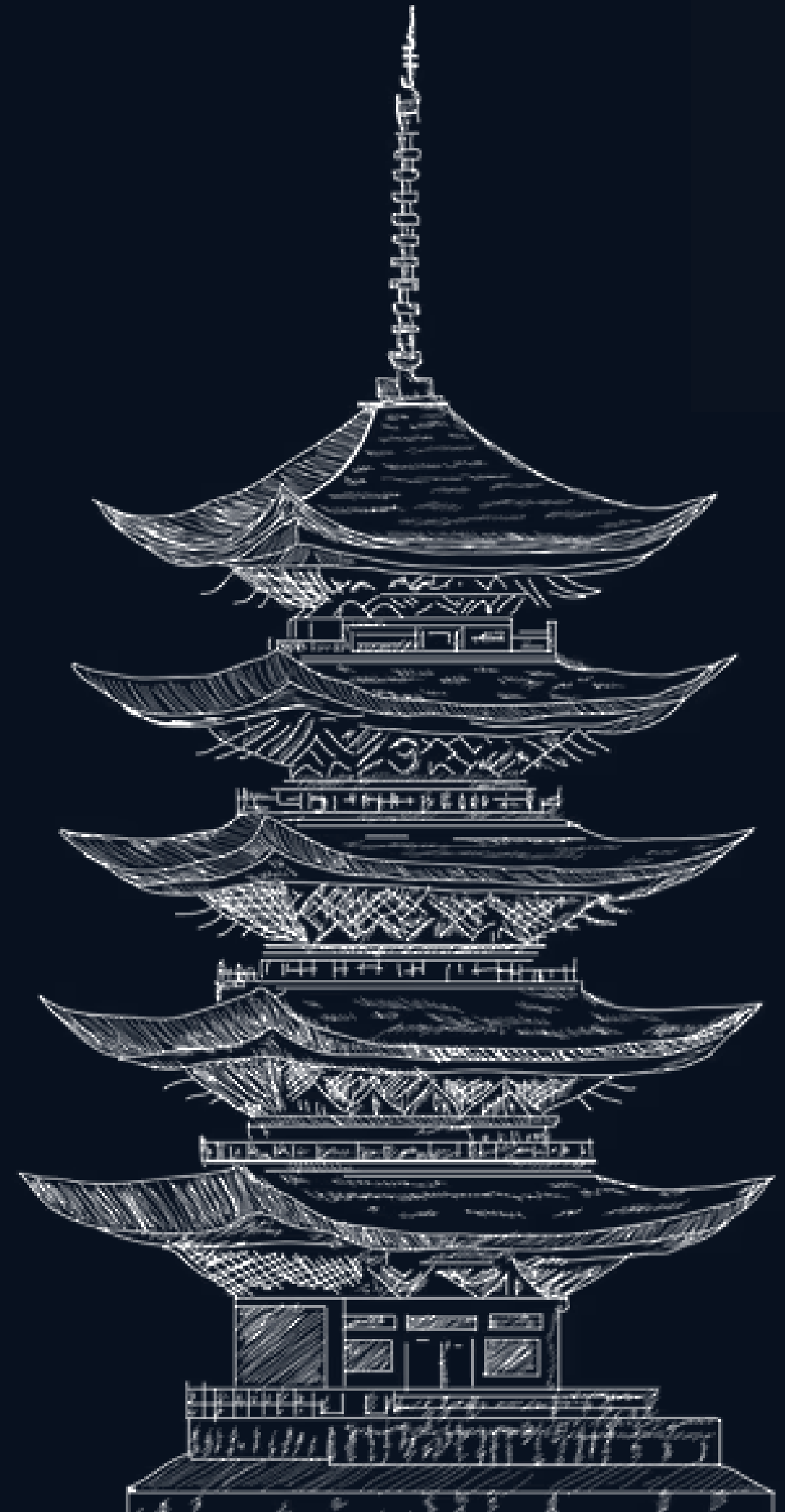
COHÉSION SOCIALE



Le Kaitai Shūri favorise la cohésion sociale à travers une **mobilisation communautaire** et en assurant la pérennité des bâtiments emblématiques d'une localité, ce qui maintient et renforce le lien des habitants avec leur histoire et leur **identité collective**.

# CONCLUSIONS ET RÉFLEXIONS

5



## SYNTHÈSE

Dans quelle mesure la pagode japonaise incarne un patrimoine culturel et symbolique d'une architecture parasismique résiliente ?

01

**Un patrimoine culturel et symbolique**

La pagode a su dépasser sa fonction religieuse et incarné un patrimoine fort et central

02

**Une conception structurelle parasismique**

A travers les assemblages, la pagode japonaise présente des performances sismiques intéressantes

03

**La nécessité d'entretien de la structure**

Le contexte environnant peut, à long terme dégrader ces performances

04

**Le Kaitai Shuri comme acte de résilience**

Bien plus qu'une intervention technique c'est un acte culturel qui contribue activement à la résilience de la pagode

05

**Un symbole d'architecture parasismique**

La pagode est conçue avec des assemblages tenons mortaises, démontables, contribuant à sa **résistance structurelle** mais aussi l'entière **démontabilité** de l'édifice garantissant sa **résilience culturelle**.

**MERCI**  
POUR VOTRE  
ATTENTION



## MÉTHODOLOGIE

## Hypothèse d'étude

L'exceptionnelle longévité des pagodes japonaises ne peut pas s'expliquer par une simple prouesse technique. Elle résulte d'une **symbiose entre deux systèmes complémentaires** :

- **Les principes structurels** - une architecture en bois flexible dont les **assemblages** dissipent l'énergie sismique et évitent la résonnance.
- **Les pratiques culturelles** - un **entretien régulier** et la **transmission du savoir** par le Kaitai Shūri (réparation par démontage)

PRINCIPES  
STRUCTURELS

Jointes tenons-mortaises



PRATIQUES  
CULTURELLES

Restauration periodique

## Objectifs

## Méthodologie

## MÉTHODOLOGIE

Hypothèse  
d'étude

## Objectifs

1

**Caractériser la pagode**

- Se focaliser sur l'architecture et la symbolique de la pagode japonaise, les techniques traditionnelles de restauration (kaitai shuri) et leur rôle essentiel ainsi que le contexte social et culturel du pays.

2

**Analyser la performance dynamique des assemblages de la structure**

- Caractériser le comportement dynamique des joints traditionnels et quantifier leur contribution au comportement sismique.

APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE

## Méthodologie

# MÉTHODOLOGIE

**Hypothèse  
d'étude**

**Objectifs**

## **Méthodologie**

- 1** Examen critique et approfondi de l'**état de l'art** et des sources historiques
- 2** **Modélisation simplifiée** de la structure sous la supervision de l'IRIDeS et basée sur une analyse de l'**état de l'art**

$$\text{RISQUE} = \sqrt{\text{EXPOSITION} * \text{VULNÉRABILITÉ}}$$

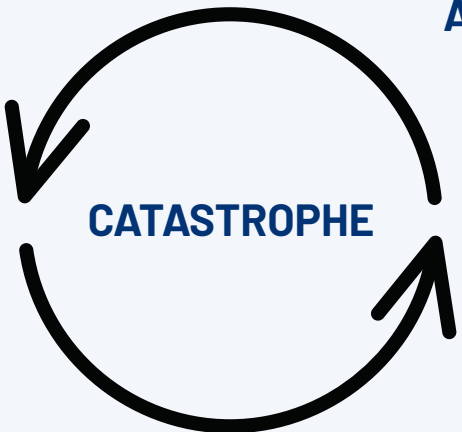
<b>WRI</b> (World Risk Index)		<b>Exposition</b>		<b>Vulnérabilité</b>	
<b>Score</b>	Rang mondial	<b>Score</b>	Rang mondial	<b>Score</b>	Rang mondial
<b>17,03</b>	28	<b>43,67</b>	3	<b>6,64</b>	175

$$\text{RISQUE} = \sqrt{\text{EXPOSITION} * \text{VULNÉRABILITÉ}}$$

Stratégies de réduction des risques liés aux catastrophes  
(DRR Disaster Risk Reduction)

**PRÉPARATION**

Planification  
Investissement  
Education



**CATASTROPHE**

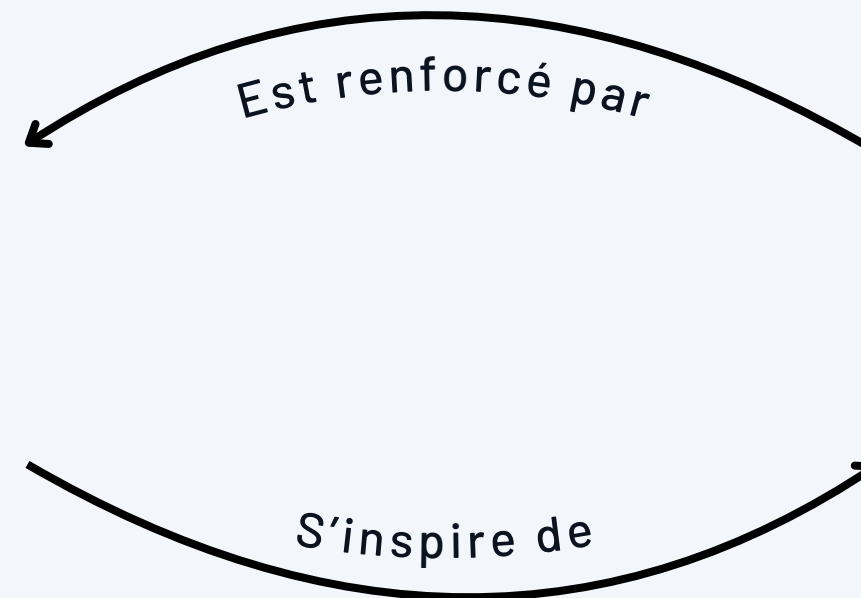
**AVERTISSEMENT ET RÉPONSE RAPIDE**

Alerte d'urgence  
Aide à l'évacuation

**RÉTABLISSEMENT**

Coopération horizontale  
Préservation de la mémoire

Mélange de compétences **techniques** et **sociales**



**CULTURE DU RISQUE**

防災文化

bosai bunka

**MÉMOIRE**

語り継ぐ

katari-tsugu

**COHÉSION SOCIALE**

水平協力

suihei kyōryoku

Pierre de Tsunamis  
commémoration,...

ils maintiennent la **conscience du risque** et encouragent la **vigilance collective**

**43,9** Millions de citoyens investis dans une organisation autonome de prévention et de gestion des catastrophes

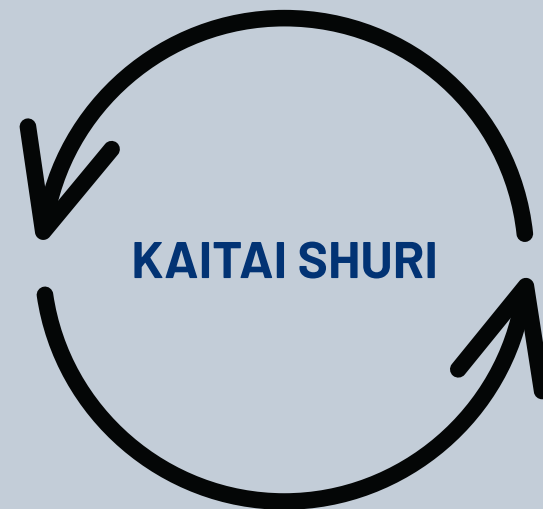
# LE KAITAI SHURI COMME TECHNIQUE ANCESTRALE DE RESTORATION

## ORIGINE

L'origine est difficile à retracer : la notion de shūri (réparation) est attestée dans les plus anciens textes écrits du Japon  
Le Kaitai shūri peut être compris non pas comme une innovation soudaine, mais comme la conséquence logique d'une double dynamique.

### CULTURE RELIGIEUSE

**Shintoïsme :**  
Reconstruction perpétuelle  
**Bouddhisme :**  
Impermanence



### CONTEXTE EXTRÊME

**Vulnérabilité :**  
Exposition constante  
**Norme d'Existence :**  
Destruction régulière

## LOI DE PROTECTION DE 1897

## TENDANCES RÉCENTES



# LE KAITAI SHURI COMME TECHNIQUE ANCESTRALE DE RESTORATION

## ORIGINE

### LOI DE PROTECTION DE 1897

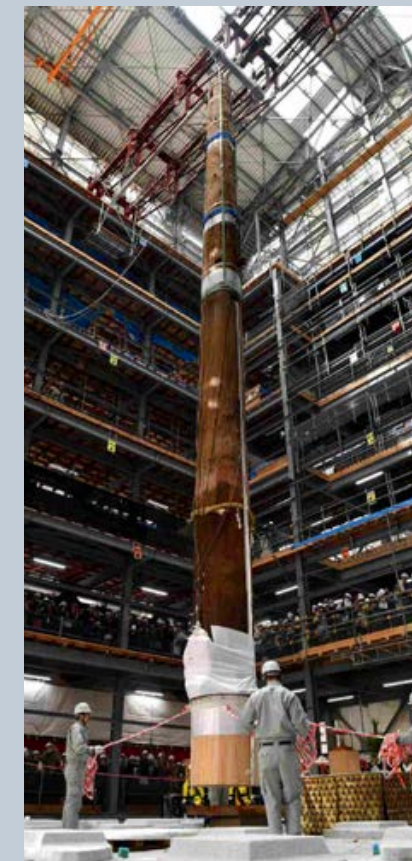


#### SUPERVISION

Les travaux, autrefois dirigés par les maitres charpentiers eux même sont confiés à des ingénieurs académiquement formés

#### MÉTHODOLOGIE

La méthodologie se complexifie et devient règlementée. Les études historiques et structurelles deviennent obligatoires



## TENDANCES RÉCENTES



# LE KAITAI SHURI COMME TECHNIQUE ANCESTRALE DE RESTORATION

ORIGINE

LOI DE PROTECTION DE 1897

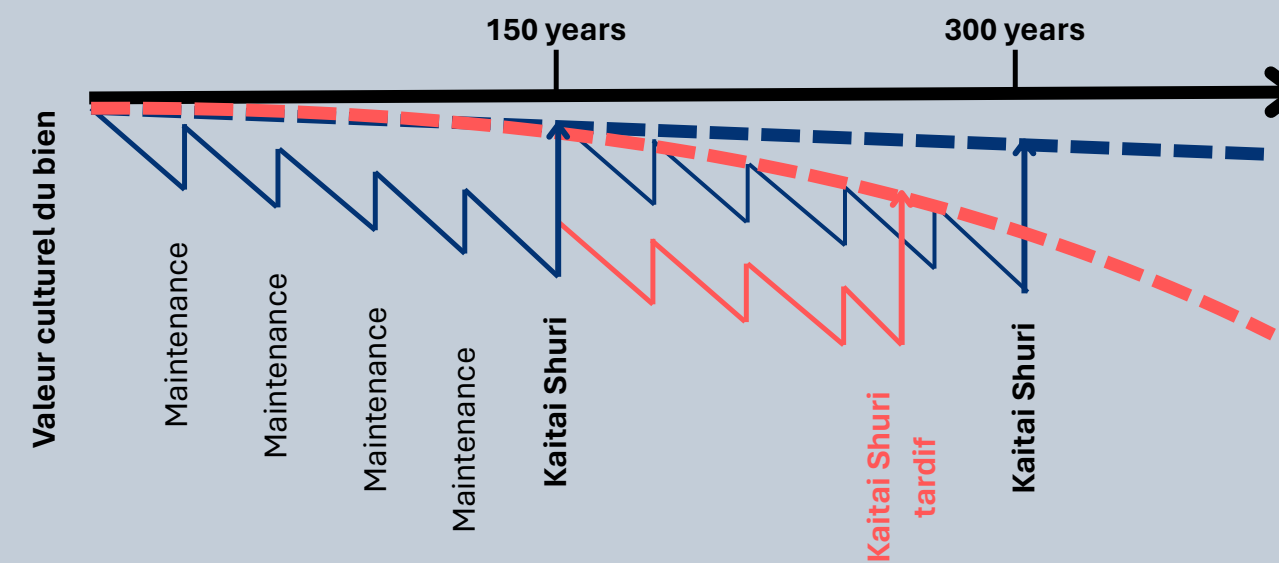
## TENDANCES RÉCENTES

### RÉEMPLOI

Des lois récentes empêchent la revente de pièces issues de restauration pour encourager le réemploi, bien qu'il ait toujours été souhaité

### PÉRIODICITÉ

Un plan a été proposé pour augmenter la périodicité des restaurations (maintenance comme kaitai shuri)



## UNE PRATIQUE QUI BOULVERSE LES SCHÉMAS EUROCENTRÉS



**1951**

### **ADHÉSION DU JAPON À L'UNESCO**

Le Japon est le premier pays asiatique à rejoindre l'organisation, marquant son retour dans l'ordre mondial.

**1993**

### **PROPOSITION DU TEMPLE HŌRYŪJI**

Le Japon propose le temple de Hōryū-ji à la liste du patrimoine mondial. Les experts européens doutent de son authenticité en raison des pièces remplacées par le Kaitai shūri.

**1994**

### **DOCUMENT DE NARA SUR L'AUTHENTICITÉ**

Initié par le Japon, ce document élargit la notion d'authenticité pour intégrer les contextes culturels spécifiques et la continuité (concept opposé à la rigidité matérielle de la Charte de Venise)

**2003**

### **ÉLABORATION DE LA ICH**

Sous l'impulsion de Koïchiro Matsuura (Directeur général de l'UNESCO), le Japon joue un rôle clé dans l'élaboration de la Convention pour la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel (2003)

