

**REGLE N° I.3.c**  
**(1<sup>er</sup> août 1985)**

*Tome I : Conception générale de la centrale et principes généraux applicables à l'ensemble de l'installation.*

*Chapitre 3 : Principes généraux de conception et d'installation.*

*Identification de la règle dans le chapitre : c.*

**OBJET: Etudes géologiques et géotechniques du site; détermination des caractéristiques des sols et études du comportement des terrains**

*Domaine d'application : Sites des centrales nucléaires comportant un réacteur à eau sous pression.*

**1. Objet de la règle**

1.1. La présente règle fondamentale de sûreté a pour objet de préciser, dans le cadre des études géologiques \* et géotechniques (\*) d'un site, d'une part les caractéristiques des sols qu'il convient de déterminer, d'autre part les études de comportement des terrains qu'il convient d'effectuer.

1.2. Le groupe permanent chargé des réacteurs nucléaires a été consulté pour l'élaboration de la présente règle.

**2. Enoncé de la règle**

Pour satisfaire aux objectifs énoncés en 1 ci-dessus, la démarche explicitée ci-après est utilisée ; pour chaque site, les caractéristiques des sols sont déterminées selon les règles définies au paragraphe 2.1 et les études de comportement des terrains définies au paragraphe 2.2 sont effectuées.

Les différences importantes des caractéristiques propres de chaque site font que la nature, l'extension et la profondeur des reconnaissances, les moyens d'étude des caractéristiques géologiques et mécaniques des terrains, les essais *in situ* ou en laboratoire doivent être adaptés à chaque cas.

*2.1. Détermination des caractéristiques des sols*

Les caractéristiques de sol à prendre en compte sont définies à partir de mesures et de prélèvements effectués sur le site.

Ces caractéristiques sont relatives à la fois :

- à la géologie pour ce qui concerne la nature et la disposition des terrains rencontrés ou rapportés sur le site ainsi qu'à l'hydrogéologie \*, qui revêt une importance particulière s'agissant des problèmes de liquéfaction \* du sol ;
- à la géotechnique pour ce qui concerne l'ensemble des données mécaniques.

Les investigations géologiques et les mesures géotechniques doivent permettre d'aboutir en particulier aux

paramètres utilisés pour les calculs relatifs à l'ensemble sol-fondation.

#### 2.1.1. Investigations géologiques et hydrogéologiques.

L'étude de la géologie du site comprend la reconnaissance des différents sols et/ou roches et de leurs dispositions géométriques, le relevé de leurs discontinuités significatives pour l'analyse envisagée et les éventuelles variations au sein des différentes formations. A cet effet, l'étude de la géologie du site doit comprendre, sauf cas particuliers justifiés, des essais d'investigations propres à la géophysique. En outre, avant réception pour bétonnage, il est procédé à un lever géologique des fonds de fouilles.

L'étude hydrogéologique comprend la reconnaissance des conditions initiales et doit prendre en compte les modifications éventuelles des nappes phréatiques pouvant résulter des variations naturelles et de l'implantation des ouvrages, qui peuvent influencer sur les caractéristiques des terrains ; à cet effet doit être mis en place un programme de surveillance de l'état des nappes pendant la durée des travaux de construction et, si cette surveillance apparaît nécessaire pour le suivi des tassements ou gonflements, pendant la durée de vie de l'installation. En cas de modification du régime hydrogéologique régional, l'utilité de la surveillance devra être réexaminée.

Les principales caractéristiques hydrogéologiques recherchées sont notamment :

- la piezométrie des nappes ;
- la perméabilité et la granularité \* des différentes couches ;
- les propriétés chimiques de l'eau ;
- éventuellement, les régimes d'écoulement.

#### 2.1.2. Investigations géotechniques.

L'étude géotechnique du site doit permettre de déterminer les caractéristiques mécaniques de sol utiles, principalement celles concernant la déformabilité et la résistance, statiques\* et dynamiques\*. Le comportement des terrains, dans les différentes zones mises en évidence par les sondages, doit être caractérisé par des paramètres mesurés sous charges statiques et dynamiques, en vue d'estimer leurs valeurs dans des limites enveloppant les conditions susceptibles de se produire.

La reconnaissance géotechnique est effectuée généralement par forages et comporte des prélèvements pour les mesures en laboratoire. Elle peut comprendre des essais mécaniques en place (essais de pénétration, essais pressiométriques) afin de mettre en évidence les variations de la nature des terrains avec la profondeur.

L'exploitant doit justifier l'absence éventuelle des mesures en laboratoire.

Les mesures des paramètres du sol doivent avant tout dégager des « fourchettes » de valeurs crédibles, à partir desquelles il sera possible de faire une étude de sensibilité du mouvement de la fondation à la variation de ces paramètres. L'étude du sol ne doit pas être faite indépendamment du calcul et de la réalisation des fondations : il faut assurer la continuité de l'intervention des ingénieurs compétents en sols et fondations depuis les études d'avant-projet jusqu'au suivi de l'installation.

Les études de sol doivent être réexaminées, en tant que de besoin, en fonction des constatations effectuées lors des fouilles, et en fonction des mesures effectuées lors de la construction et de l'exploitation (tassements ou gonflements, niveaux d'eau, etc.).

---

\* Les termes suivis d'un astérisque renvoient au glossaire présenté à la fin de la présente règle.

### *Etendue des investigations*

L'étendue et la finesse des sondages dépendent à la fois de l'hétérogénéité du terrain et de la nature des installations projetées. La maille des sondages ou des profils de reconnaissance géophysique est définie par l'exploitant et les résultats de l'ensemble des mesures sont présentés dans les rapports de sûreté.

En règle générale, pour un site non rocheux, si  $h$  est la profondeur d'enfoncement d'un bâtiment,  $\phi$  son diamètre, on effectue une reconnaissance jusqu'à une profondeur au moins égale à la plus grande des valeurs  $2\phi$  et  $2h$ . Pour ce qui concerne le cas d'un site rocheux, il est effectué essentiellement une reconnaissance des zones altérées ou fissurées ou fracturées.

On peut, cependant, déroger à cette valeur minimale de profondeur de sondage, dans la mesure où une justification est fournie. La finesse et l'extension des mesures des paramètres du sol doivent être justifiées par des études portant sur la sensibilité, à l'égard de ces paramètres, des résultats obtenus avec les méthodes utilisées dans le calcul des ouvrages.

Pour déterminer les caractéristiques statiques et dynamiques des terrains, on utilisera de façon générale des procédures normalisées \*. Dans le cas contraire, les procédures utilisées devront être décrites et justifiées.

### *Caractéristiques statiques*

Il est procédé à l'identification ainsi qu'à la détermination des propriétés physiques et mécaniques des différentes couches de terrains constituant le sol de fondation (granulométrie, densité, teneur en eau, indice des vides, module d'Young, résistance au cisaillement...).

Pour ce faire, les essais et techniques qui suivent sont généralement utilisés *in situ* :

- pénétromètre ;
- pressiomètre ;
- essais de chargement ;
- scissomètre.

Ils sont complétés par des essais en laboratoire (essais oedométriques, essais de cisaillement, essais triaxiaux). Les incertitudes sur les paramètres mesurés peuvent être considérées comme significatives sans corrections lorsque le pourcentage des éléments à granularité importante éliminés est faible (15 %). On cherche à faire en sorte que les conditions des essais en laboratoire représentent les conditions réelles du sol en place.

### *Caractéristiques dynamiques*

Les deux principaux paramètres à mesurer sont le module d'Young et le coefficient de Poisson. Les variations de ces deux paramètres en plan et selon la profondeur seront déterminées avec les incertitudes correspondantes afin de permettre d'examiner l'incidence d'un ensemble de valeurs possibles, à la fois sur le mouvement du sol et sur l'interaction sol-fondation. Ces deux paramètres sont déterminés essentiellement par des mesures *in situ* des vitesses de propagation des ondes de cisaillement et de compression. Des mesures en laboratoire complètent, pour les sols qui s'y prêtent, les mesures *in situ*, en particulier pour déterminer les lois de variation du module d'Young en fonction de la déformation, pour des nombres de cycles représentatifs des séismes considérés comme plausibles, ainsi que de l'amortissement interne du matériau. Ces essais en laboratoire doivent permettre des déformations relativement élevées. Pour les petites déformations ( $10^{-4}$ ), on emploiera des essais pour lesquels la validité aura été préalablement mise en évidence.

## 2.2. Etude du comportement des terrains

Les études de comportement des terrains portent sur les terrains de fondation, les éventuels ouvrages en terre du site, les terrains situés au voisinage des installations nucléaires.

Comme mentionné ci-dessus, l'étendue des terrains étudiés doit être telle que les incertitudes sur les mesures relatives à ces terrains aient une influence négligeable sur le résultat des études de comportement.

### 2.2.1. Tassements et gonflements.

Il convient d'évaluer l'amplitude des déformations et des tassements ou gonflements du sol de fondation dès la construction et pendant la durée de vie de l'ouvrage ; de même, il faut vérifier la compatibilité de cette amplitude avec les déplacements admissibles pour l'ouvrage et les équipements qui lui sont rattachés. L'exploitant étudie les évolutions envisageables des caractéristiques des terrains et définit un programme de surveillance couvrant la période de construction et d'exploitation des installations ; en tant que de besoin, des dispositions particulières seront prises pour suivre l'évolution des phénomènes différés.

Dans le cas où les valeurs de tassements ou gonflements observés après construction sont significativement supérieures aux valeurs prévisionnelles, les caractéristiques géologiques, géotechniques et hydrogéologiques énoncées plus haut doivent être réexaminées afin de mettre en évidence, d'un point de vue physique, la cause de l'anomalie.

### 2.2.2. Liquéfaction.

Le risque de liquéfaction, sous l'effet des mouvements sismiques de forte intensité, est un risque spécifique de certains terrains, qu'il convient, le cas échéant, d'analyser avec soin. Dans ce cas, les indices éventuels d'une liquéfaction antérieure sur le site, ou dans des terrains voisins et analogues sont recherchés lors de l'étude géologique du site.

Ces terrains, quand leur perméabilité est inférieure à  $10^{-2}$  m/s, font l'objet d'une analyse du risque de liquéfaction. Pour ces terrains, le risque de liquéfaction est déterminé à partir de l'évaluation du potentiel de liquéfaction.

L'évaluation de la possibilité de liquéfaction comporte généralement les trois étapes suivantes :

- une évaluation des contraintes\* de cisaillement pouvant résulter des séismes considérés comme plausibles. Ces derniers sont représentés par un nombre de cycles de sollicitations d'amplitude constante d'effet total équivalent; l'exploitant doit fournir les justifications de l'équivalence du choix du nombre de cycles ;
- la détermination de la résistance du sol à des cycles de cisaillement par des essais appropriés en laboratoire (essais triaxiaux, essais de cisaillement simple.) et *in situ* (essais de pénétration) ;
- la comparaison de la résistance aux cycles de cisaillement ainsi déterminés et des contraintes pouvant résulter des séismes considérés comme plausibles, afin de montrer qu'il n'y a pas de risque de liquéfaction du sol.

Les résultats de cette évaluation doivent conduire à démontrer l'existence d'une marge de sécurité suffisante à l'égard des risques de propagation d'une liquéfaction des couches de terrains concernés et des remblais. La marge de sécurité acceptable doit être fixée dans chaque cas d'espèce.

En première approximation, un coefficient de sécurité de 1,3 à 1,5 (rapport de la résistance à ces cycles de

---

\* Les termes suivis d'un astérisque renvoient au glossaire présenté à la fin de la présente règle.

cisaillement aux contraintes pouvant résulter des séismes considérés comme plausibles) peut être retenu, mais il peut être nécessaire, dans certains cas, d'utiliser des valeurs plus élevées, par exemple, pour des sables de faible compacité.

Si l'évaluation conduit à un coefficient de sécurité insuffisant, il y a lieu d'effectuer des calculs en déformation\*. L'exploitant doit alors proposer un critère de déformation acceptable. Enfin, si ces derniers calculs ne satisfont pas à ce critère, il y a lieu d'accroître la résistance des terrains.

La méthode proposée ci-dessus est l'approche habituelle des problèmes de liquéfaction sur un site.

Toutefois, l'exploitant peut proposer une autre méthode d'approche en justifiant sa validité.

### 2.2.3. Stabilité des pentes.

La stabilité de tous les types de pentes, en terre, en roche, de neige ou de glace, soit naturelles, soit dues aux activités humaines, y compris les travaux sur le site (par exemple : falaises, digues, barrages, remblais...) doit être examinée dans la mesure où la rupture de ces pentes pourrait compromettre la sûreté des installations.

Un calcul d'équilibre limite est en général effectué pour l'analyse de la stabilité des pentes.

Les pentes rocheuses font l'objet d'un traitement particulier en prenant en considération les possibilités de glissements privilégiés dus à des fissurations ou fracturations éventuelles de la roche.

### 2.2.4. Rejeux \* de faille.

Les données sismotectoniques actuellement disponibles en France montrent que les rejeux de faille en surface sont actuellement exceptionnels. Cependant, si les reconnaissances des terrains du site mettent en évidence certains accidents pouvant être interprétés comme des manifestations de telles failles, il y a lieu de s'assurer par une analyse tectonique et néotectonique détaillée que le risque de rejeu, pendant la durée de vie de l'installation, peut être écarté.

## GLOSSAIRE

**Contrainte :**

Pression orientée s'exerçant en un point d'un corps matériel.

**Déformation :**

Changement de forme d'un solide sous l'influence d'une contrainte.

**Dynamique :**

Partie de la mécanique qui étudie le mouvement considéré dans ses rapports avec les forces qui en sont les causes.

**Granularité :**

Résultat d'une granulométrie.

**Granulométrie :**

Mesure des dimensions et détermination de la forme des particules ou des grains.

**Géologie :**

Science comprenant l'étude des parties de la terre directement accessibles à l'observation et l'élaboration hypothèses qui permettent de reconstituer leur histoire et d'expliquer leur agencement.

**Géotechnique :**

Partie de la géologie concernant les applications techniques de recherches géologiques dans le domaine du génie civil.

**Hydrogéologie :**

Partie de la géologie qui s'occupe de la circulation des eaux dans le sol.

**Liquéfaction :**

Processus de transformation d'une substance en un liquide. Pour un sable, la liquéfaction correspond à une perte totale, temporaire ou définitive, de la résistance au cisaillement.

**Œdométrique (Essai) :**

Un essai œdométrique est un essai qui permet la mesure de l'amplitude d'un tassement ainsi que l'étude de son évolution en fonction du temps.

*Procédures normalisées :*

Procédures qui font l'objet de recommandations ou de spécifications, par exemple :

- modes opératoires recommandés par le Laboratoire central des ponts et chaussées ;
- normes spécifiées par l'ASTM (American Society for Testing and Materials).

**Rejeu :**

Mouvement des lèvres (surfaces engendrées par les cassures) d'une faille l'une par rapport à l'autre.

**Scissomètre :**

Appareil permettant de déterminer la résistance au cisaillement d'un sol cohérent.

Statique :

Partie de la mécanique qui étudie les systèmes de points matériels soumis à l'action des forces quand elles ne créent aucun mouvement.