

COLLECTION  
**GÉNIE  
ATOMIQUE**

# Exercices de neutronique



**Paul REUSS**

**instn**

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES  
ET TECHNIQUES NUCLEAIRES

  
**EDP**  
SCIENCES



# EXERCICES DE NEUTRONIQUE

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

GÉNIE ATOMIQUE

# Exercices de Neutronique

Paul Reuss

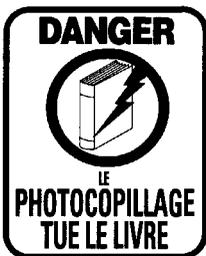


17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

Illustration de couverture : © Photo CEA/ Patrick Dumas

Composition sous  $\text{\LaTeX}$  :  $\text{\ScripTeX}$

ISBN : 2-86883-706-9



Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2004

# Introduction à la collection « Génie Atomique »

---

Au sein du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) est un établissement d'enseignement supérieur sous la tutelle du ministère de l'Éducation nationale et du ministère de l'Industrie. La mission de l'INSTN est de contribuer à la diffusion des savoir-faire du CEA au travers d'enseignements spécialisés et de formations continues, tant à l'échelon national, qu'aux plans européen et international.

Cette mission reste centrée sur le nucléaire, avec notamment l'organisation d'une formation d'ingénieur en « Génie Atomique ». Fort de l'intérêt que porte le CEA au développement de ses collaborations avec les universités et les écoles d'ingénieurs, l'INSTN a développé des liens avec des établissements d'enseignement supérieur aboutissant à l'organisation, en co-habilitation, de nombreux enseignements de niveau maîtrise. À ces formations s'ajoutent les enseignements des disciplines de santé : les spécialisations en médecine nucléaire et en radiopharmacie, ainsi qu'une formation destinée aux physiciens d'hôpitaux.

La formation continue constitue un autre volet important des activités de l'INSTN, lequel s'appuie aussi sur les compétences développées au sein du CEA et chez ses partenaires industriels.

Dispensé dès 1956 au CEA Saclay, où ont été bâties les premières piles expérimentales, la formation en « Génie Atomique » (GA) l'est également depuis 1976 à Cadarache où a été développée la filière des réacteurs à neutrons rapides. Depuis 1958, le GA est enseigné à l'École des applications militaires de l'énergie atomique (EAMEA) sous la responsabilité de l'INSTN.

Depuis sa création, l'INSTN a diplômé plus de 4 000 ingénieurs que l'on retrouve aujourd'hui dans les grands groupes ou organismes du secteur nucléaire français : CEA, EDF, Framatome, Technicatome, Cogema, Marine nationale. De très nombreux étudiants étrangers provenant de différents pays ont également suivi cette formation.

Cette spécialisation s'adresse à deux catégories d'étudiants : civils et militaires. Les étudiants civils occuperont des postes d'ingénieurs d'études ou d'exploitation dans les réacteurs nucléaires, électrogènes ou de recherches, ainsi que dans les installations du cycle du combustible. Ils pourront évoluer vers des postes d'experts dans l'analyse du risque nucléaire et de l'évaluation de son impact environnemental. La formation de certains officiers des sous-marins et porte-avions nucléaires français est dispensée par l'EAMEA.

Le corps enseignant est formé par des chercheurs du CEA, des experts de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), des ingénieurs de l'industrie (EDF, AREVA, ...). Les principales matières sont : la physique nucléaire et la neutronique, la thermohydraulique, les matériaux nucléaires, la mécanique, la protection radiologique, l'instrumentation nucléaire, le fonctionnement et la sûreté des réacteurs à eau sous pression (REP), les filières et le cycle du combustible nucléaire. Ces enseignements dispensés sur une durée de six mois sont suivis d'un projet de fin d'étude, véritable prolongement de la formation réalisé à partir d'un cas industriel concret, se déroulant dans les centres de recherches du CEA, des groupes industriels (EDF, Framatome, Technicatome, etc.) ou à l'étranger (États-Unis, Canada, Royaume-Uni, ...). La spécificité de cette formation repose sur la large place consacrée aux enseignements pratiques réalisés sur les installations de l'INSTN (réacteur Ulysse, simulateurs de REP, laboratoires de radiochimie, etc.).

Aujourd'hui, en pleine maturité de l'industrie nucléaire, le diplôme d'ingénieur en « Génie Atomique » reste sans équivalent dans le système éducatif français et affirme sa vocation : former des ingénieurs qui auront une vision globale et approfondie des sciences et techniques mises en œuvre dans chaque phase de la vie des installations nucléaires, depuis leur conception et leur construction jusqu'à leur exploitation puis leur démantèlement.

L'INSTN s'est engagé à publier l'ensemble des supports de cours dans une collection d'ouvrages destinés à devenir des outils de travail pour les étudiants en formation et à faire connaître le contenu de cet enseignement dans les établissements d'enseignement supérieur français et européens. Édités par EDP Sciences, acteur particulièrement actif et compétent dans la diffusion du savoir scientifique, ces ouvrages sont également destinés à dépasser le cadre de l'enseignement pour constituer des outils indispensables aux ingénieurs et techniciens du secteur industriel.

Joseph Safieh  
Responsable général  
du cours de Génie Atomique

# Sommaire

---

<b>AVANT-PROPOS</b>	<b>7</b>
<b>AUTEUR</b>	<b>9</b>
<b>ÉNONCÉS</b>	<b>11</b>
<b>PARTIE I • BASES DE PHYSIQUE NEUTRONIQUE</b>	<b>13</b>
<b>CHAPITRE 1 • INTRODUCTION : GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE 2 • PHYSIQUE NUCLÉAIRE À L'USAGE DU NEUTRONICIEN</b>	<b>18</b>
2.1 Structure de la matière et énergie de liaison des noyaux	18
2.2 Radioactivité	20
2.3 Réactions par neutrons	21
2.4 Fission	23
<b>CHAPITRE 3 • INTRODUCTION À LA NEUTRONIQUE</b>	<b>24</b>
<b>CHAPITRE 4 • CINÉTIQUE PONCTUELLE</b>	<b>28</b>
<b>CHAPITRE 5 • ÉQUATION DE LA DIFFUSION</b>	<b>31</b>
<b>CHAPITRE 6 • THÉORIE À UN GROUPE – DIFFUSION</b>	<b>34</b>
<b>CHAPITRE 7 • RALENTISSEMENT DES NEUTRONS</b>	<b>38</b>
<b>CHAPITRE 8 • ABSORPTION RÉSONNANTE DES NEUTRONS (ASPECTS PHYSIQUES)</b>	<b>42</b>
<b>CHAPITRE 9 • THERMALISATION DES NEUTRONS</b>	<b>45</b>
<b>CHAPITRE 10 • THÉORIE MULTIGROUPE</b>	<b>49</b>
<b>CHAPITRE 11 • EMPOISONNEMENT PAR LES PRODUITS DE FISSION</b>	<b>51</b>
<b>CHAPITRE 12 • ÉVOLUTION DU COMBUSTIBLE (NOYAUX LOURDS)</b>	<b>55</b>
<b>CHAPITRE 13 • EFFETS DE TEMPÉRATURE</b>	<b>59</b>

<b>PARTIE II • ÉLÉMENTS SUR LES CALCULS DE NEUTRONIQUE</b>	<b>63</b>
<b>CHAPITRE 14 • ÉQUATION DE BOLTZMANN</b>	<b>65</b>
14.1 Étude de l'équation de Boltzmann	65
14.2 Traitement de l'énergie et du temps	67
14.3 Probabilités de collision	68
14.4 Traitement de la forme intégrodifférentielle	72
14.5 Mode fondamental	74
14.6 Méthode de Monte-Carlo	77
<b>CHAPITRE 15 • THÉORIE DE L'ABSORPTION RÉSONNANTE DES NEUTRONS</b>	<b>79</b>
<b>CHAPITRE 16 • THÉORIE DES PERTURBATIONS</b>	<b>82</b>
<b>CHAPITRE 17 • APERÇU GÉNÉRAL SUR LE « SCHÉMA DE CALCUL »</b>	<b>84</b>
<b>CHAPITRE 18 • APERÇU SUR LES PROBLÈMES DE CONCEPTION DES CŒURS</b>	<b>91</b>
<b>PARTIE III • SUJETS D'EXAMEN</b>	<b>95</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 1994</b>	<b>97</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 1995</b>	<b>101</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 1996</b>	<b>105</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 1997</b>	<b>109</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 1998</b>	<b>112</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 1999</b>	<b>115</b>
<b>EXAMEN DE MARS 2000</b>	<b>119</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 2000</b>	<b>122</b>
<b>EXAMEN DE MARS 2001</b>	<b>125</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 2001</b>	<b>128</b>
<b>EXAMEN DE MARS 2002</b>	<b>131</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 2002</b>	<b>134</b>
<b>EXAMEN DE MARS 2003</b>	<b>138</b>
<b>EXAMEN DE NOVEMBRE 2003</b>	<b>142</b>
<b>EXAMEN DE FÉVRIER 2004</b>	<b>145</b>

<b>SOLUTIONS</b>	<b>149</b>
<b>PARTIE I • BASES DE PHYSIQUE NEUTRONIQUE</b>	<b>151</b>
CHAPITRE 1 • INTRODUCTION : GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE	153
CHAPITRE 2 • PHYSIQUE NUCLÉAIRE À L'USAGE DU NEUTRONICIEN	155
2.1 Structure de la matière et énergie de liaison des noyaux	155
2.2 Radioactivité	157
2.3 Réactions par neutrons	158
2.4 Fission	161
CHAPITRE 3 • INTRODUCTION À LA NEUTRONIQUE	163
CHAPITRE 4 • CINÉTIQUE PONCTUELLE	168
CHAPITRE 5 • ÉQUATION DE LA DIFFUSION	172
CHAPITRE 6 • THÉORIE À UN GROUPE – DIFFUSION	179
CHAPITRE 7 • RALENTISSEMENT DES NEUTRONS	189
CHAPITRE 8 • ABSORPTION RÉSONNANTE DES NEUTRONS (ASPECTS PHYSIQUES)	194
CHAPITRE 9 • THERMALISATION DES NEUTRONS	198
CHAPITRE 10 • THÉORIE MULTIGROUPE	202
CHAPITRE 11 • EMPOISONNEMENT PAR LES PRODUITS DE FISSION	205
CHAPITRE 12 • ÉVOLUTION DU COMBUSTIBLE (NOYAUX LOURDS)	210
CHAPITRE 13 • EFFETS DE TEMPÉRATURE	216
<b>PARTIE II • ÉLÉMENTS SUR LES CALCULS DE NEUTRONIQUE</b>	<b>221</b>
CHAPITRE 14 • ÉQUATION DE BOLTZMANN	223
14.1 Étude de l'équation de Boltzmann	223
14.2 Traitement de l'énergie et du temps	227
14.3 Probabilités de collision	228
14.4 Traitement de la forme intégrodifférentielle	233
14.5 Mode fondamental	238
14.6 Méthode de Monte-Carlo	240
CHAPITRE 15 • THÉORIE DE L'ABSORPTION RÉSONNANTE DES NEUTRONS	242
CHAPITRE 16 • THÉORIE DES PERTURBATIONS	246
CHAPITRE 17 • APERÇU GÉNÉRAL SUR LE « SCHÉMA DE CALCUL »	248
CHAPITRE 18 • APERÇU SUR LES PROBLÈMES DE CONCEPTION DES CŒURS	256

---

<b>PARTIE III • SUJETS D'EXAMEN</b>	<b>263</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 1994</b>	<b>265</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 1995</b>	<b>269</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 1996</b>	<b>275</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 1997</b>	<b>280</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 1998</b>	<b>284</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 1999</b>	<b>287</b>
<b>EXAMEN DE MARS 2000</b>	<b>290</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 2000</b>	<b>293</b>
<b>EXAMEN DE MARS 2001</b>	<b>296</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 2001</b>	<b>299</b>
<b>EXAMEN DE MARS 2002</b>	<b>303</b>
<b>EXAMEN DE DÉCEMBRE 2002</b>	<b>307</b>
<b>EXAMEN DE MARS 2003</b>	<b>312</b>
<b>EXAMEN DE NOVEMBRE 2003</b>	<b>317</b>
<b>EXAMEN DE FÉVRIER 2004</b>	<b>322</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>327</b>

# Avant-Propos

---

Ce recueil d'exercices a été conçu à l'intention des élèves de deuxième année de la formation d'ingénieurs en *Génie Atomique* pour leur permettre d'approfondir leurs cours de neutronique et de se préparer aux épreuves de contrôle des connaissances.

Le plan de ce recueil est calqué sur celui du *Précis de neutronique* présentant les principaux éléments théoriques de cette branche de la physique. Dans le *Précis*, nous nous sommes limités aux apports théoriques et à quelques applications essentielles. Dans le présent recueil d'exercices, on pourra trouver d'autres applications et calculs d'ordres de grandeur utiles pour étayer les notions théoriques.

Aux dix-huit chapitres correspondant à ceux du *Précis* ont été ajoutées les sujets proposés en examen ces dernières années<sup>(1)</sup> : ils permettront aux élèves de mieux se rendre compte de ce qui est attendu d'eux.

Il nous a paru utile de permettre au lecteur une autocorrection. C'est pourquoi les solutions des exercices et problèmes sont données, sous une forme parfois simplifiée, parfois plus détaillée, pour qu'il puisse vérifier ses conclusions. Nous lui suggérons très expressément de ne pas aller trop vite aux solutions : certes, aboutir à des raisonnements et des résultats justes — et pouvoir s'en assurer — est l'objectif final ; mais, qu'elles soient correctes ou inexactes, les errances dans les réflexions sur un problème sont seules réellement formatrices.

P. R.  
Saclay, juin 2004.

---

1. La formation de Génie Atomique a été repensée en 1999. Seuls les examens des années scolaires 1999-2000 et au-delà correspondent exactement au nouveau syllabus concrétisé par le *Précis de neutronique*.

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

# Auteur

---

Paul Reuss est ancien élève de l'École polytechnique et docteur ès sciences physiques. Il a mené toute sa carrière au Commissariat à l'énergie atomique (CEA), à Saclay et à Fontenay-aux-Roses, se partageant entre les activités de recherche et développement, l'enseignement et la formation.

Ses activités de recherche ont porté sur l'amélioration, la validation et la qualification des codes de calcul pour ordinateur utilisés par les ingénieurs pour la conception et le suivi des cœurs des centrales nucléaires, notamment CORÉGRAF (réacteurs à uranium naturel et à graphite) et APOLLO (réacteurs de tous types et, spécialement, réacteurs à eau). Parmi les développements auxquels il a participé, on retiendra l'étude physique du recyclage du plutonium dans les réacteurs à eau (objet de sa thèse de doctorat d'État), la généralisation de la théorie de l'absorption résonnante des neutrons, et la « recherche de tendances », c'est-à-dire l'exploitation des mesures de neutronique faites sur les expériences critiques et sur les réacteurs de puissance pour améliorer la connaissance des données nucléaires. Plus d'une centaine de publications techniques peuvent être mises à son actif.

Après avoir suivi le DEA de Physique des réacteurs nucléaires, Paul Reuss est rapidement intervenu comme chargé de cours, puis comme professeur responsable de ce DEA. Il a aussi animé de nombreux autres enseignements. Il est aujourd'hui le professeur coordinateur de l'enseignement de neutronique au *Génie atomique*. Outre ce « *Précis de neutronique* », il est l'auteur de plusieurs ouvrages pédagogiques sur la neutronique et la physique nucléaire, notamment, avec Jean Bussac, du *Traité de neutronique* qui a été et reste l'ouvrage de référence pour les étudiants et les spécialistes.

Paul Reuss a suivi les travaux d'une vingtaine de doctorants et a participé à plus de cent jurys de thèse. Parmi ses autres activités liées à la formation, notons qu'il a été pendant deux ans responsable de formation à l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN, maintenant IRSN), qu'il a animé, au CEA et surtout à Électricité de France, de nombreux séminaires sur la physique neutronique, sur la théorie du transport des neutrons et sur l'absorption neutronique, et qu'il a rédigé les très complets polycopiés associés.

**Ouvrages de Paul Reuss parus en librairie :**

- *Traité de neutronique*, Hermann, 1978 et 1985, 670 pages (en collaboration avec Jean Bussac).
- *Éléments de physique nucléaire à l'usage du neutronicien*, coll. « Enseignement », CEA/INSTN, 1981, 1987 et 1995, 91 pages.
- *Éléments de neutronique*, coll. « Enseignement », CEA/INSTN, 1986 et 1995, 175 pages.
- *Clefs pour la neutronique des réacteurs à eau*, coll. « Enseignement », CEA/INSTN, 1990, 348 pages.
- *L'Énergie nucléaire*, coll. « Que sais-je? », n° 317, PUF, 1994 et 1999, 128 pages.
- *La Neutronique*, coll. « Que sais-je? », n° 3307, PUF, 1998, 128 pages.
- *Précis de neutronique*, coll. « Génie atomique », EDP Sciences, 2003, 533 pages.

# ÉNONCÉS

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

**Partie I**

**BASES DE PHYSIQUE  
NEUTRONIQUE**

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

- c) On remarque que  $d^2S \cos \theta X \Upsilon(\cos \theta)$  est l'élément de volume et que l'intégrale de ce terme, compte tenu de l'échelon unité, donne le volume complet :

$$\int_{(S)} d^2S \cos \theta X \Upsilon(\cos \theta) = V.$$

L'intégrale double est donc :

$$\int_{(4\pi)} d^2\Omega V = 4\pi V,$$

d'où le théorème de Cauchy.

### Exercice 14.8 : théorème de réciprocité (et probabilités d'absorption)

- a) On a :

$$\Phi = \frac{S}{\Sigma_a}, \quad J_- = \frac{S}{4\Sigma_a}, \quad Q = \frac{S \Sigma_t}{\Sigma_a}.$$

- b) Il y a  $V \Sigma_t \Phi$  collisions dans le volume  $V$  par unité de temps.

- c) En explicitant les deux catégories de neutrons :

$$V \Sigma_t \Phi = V Q P_{VV} + S J_- P_{SV}.$$

- d) Cela conduit à :

$$P_{SV} = \frac{4 V \Sigma_t}{S} P_{VS}.$$

- e) De façon similaire :

$$P_{SV}^* = \frac{4 V \Sigma_a}{S} P_{VS}^* = \frac{4 V \Sigma_a}{S} (1 - P_{VV}^*).$$

### Exercice 14.9 : moments de la corde

- a) *Plaque* : axe  $\vec{z}$  pris selon la direction entrante :

$$\langle X^n \rangle = 2 \int_0^1 \left( \frac{2a}{\mu} \right)^n \mu d\mu.$$

Seul le premier moment  $\langle X \rangle = 4a$  est fini.

- b) *Cylindre* : axe  $\vec{x}$  pris selon la direction entrante et axe  $\vec{z}$  selon la génératrice :

$$\langle X^n \rangle = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} d\varphi \int_0^\pi \sin \theta d\theta \left( \frac{2R \cos \varphi}{\cos \theta} \right)^n \sin \theta \cos \varphi.$$

En particulier :

$$\langle X \rangle = 2R, \quad \langle X^2 \rangle = \frac{16R^2}{3}, \quad Q = \frac{4}{3}.$$

c) Sphère : axe  $\vec{z}$  pris selon la direction entrante :

$$\langle X^n \rangle = 2 \int_0^1 (2R\mu)^n \mu \, d\mu.$$

En particulier :

$$\langle X \rangle = \frac{4}{3}R, \quad \langle X^2 \rangle = 2R^2, \quad Q = \frac{9}{8}.$$

### Exercice 14.10 : probabilités de collision pour une sphère

En posant  $u = R\Sigma$  :

$$P_{SS} = \frac{1 - (1 + 2u)e^{-2u}}{2u^2}; \quad P_{VV} = 1 - \frac{3[2u^2 - 1 + (1 + 2u)e^{-2u}]}{8u^3}.$$

### Exercice 14.11 : probabilités de collision dans un damier

L'approximation réduit le calcul aux seules probabilités sans sortie pour chacune de deux cellules :

$$P_{ij} = P_{ij}^+ + P_{is}^+ P_{SS,B}^+ P_{Sj}^+ + P_{is}^+ P_{SS,B}^+ P_{SS,A}^+ P_{SS,B}^+ P_{Sj}^+ + P_{is}^+ P_{SS,B}^+ P_{SS,A}^+ P_{SS,B}^+ P_{SS,A}^+ P_{SS,B}^+ P_{Sj}^+ + \dots;$$

$$P_{ij} = P_{ij}^+ + \frac{P_{is}^+ P_{SS,B}^+ P_{Sj}^+}{1 - P_{SS,A}^+ P_{SS,B}^+};$$

et :

$$P_{ik} = P_{is}^+ P_{Sk}^+ + P_{is}^+ P_{SS,B}^+ P_{SS,A}^+ P_{Sk}^+ + P_{is}^+ P_{SS,B}^+ P_{SS,A}^+ P_{SS,B}^+ P_{SS,A}^+ P_{Sk}^+ + \dots;$$

$$P_{ik} = \frac{P_{is}^+ P_{Sk}^+}{1 - P_{SS,A}^+ P_{SS,B}^+};$$

et formules symétriques pour  $P_{ki}$  et  $P_{k\ell}$ .

### Exercice 14.12 : calcul du facteur de désavantage

a) Bilan des collisions :

$$V_1 \Sigma_{t1} \Phi_1 = V_1 \Sigma_{s1} \Phi_1 P_{11} + (V_2 \Sigma_{s2} \Phi_2 + 1) P_{21},$$

$$V_2 \Sigma_{t2} \Phi_2 = V_1 \Sigma_{s1} \Phi_1 P_{12} + (V_2 \Sigma_{s2} \Phi_2 + 1) P_{22}.$$

b) Ces deux équations permettent de calculer les deux flux  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$ , leur rapport  $\Phi_2/\Phi_1$  (facteur de désavantage) et le facteur d'utilisation thermique  $f$  :

$$\frac{1}{f} - 1 = \frac{\Sigma_{a2}}{\Sigma_{t2}} \left[ \frac{V_2 \Sigma_{t2}}{V_1 \Sigma_{t1}} \left( \frac{P_{11}}{1 - P_{11}} + \frac{\Sigma_{t1}}{\Sigma_{a1}} \right) - 1 \right].$$