

**Anne-Sophie EVRARD**

Chargée de recherche  
(Univ Eiffel/TS2/Umrestte)

**EPICLIN 2023**  
**Session 9 : Exposition**  
**environnementale**

11 mai 2023

# Médiation et modération dans les relations entre exposition au bruit et effets sur la santé



# **Les effets du bruit environnemental sur la santé**

# Définition du bruit environnemental

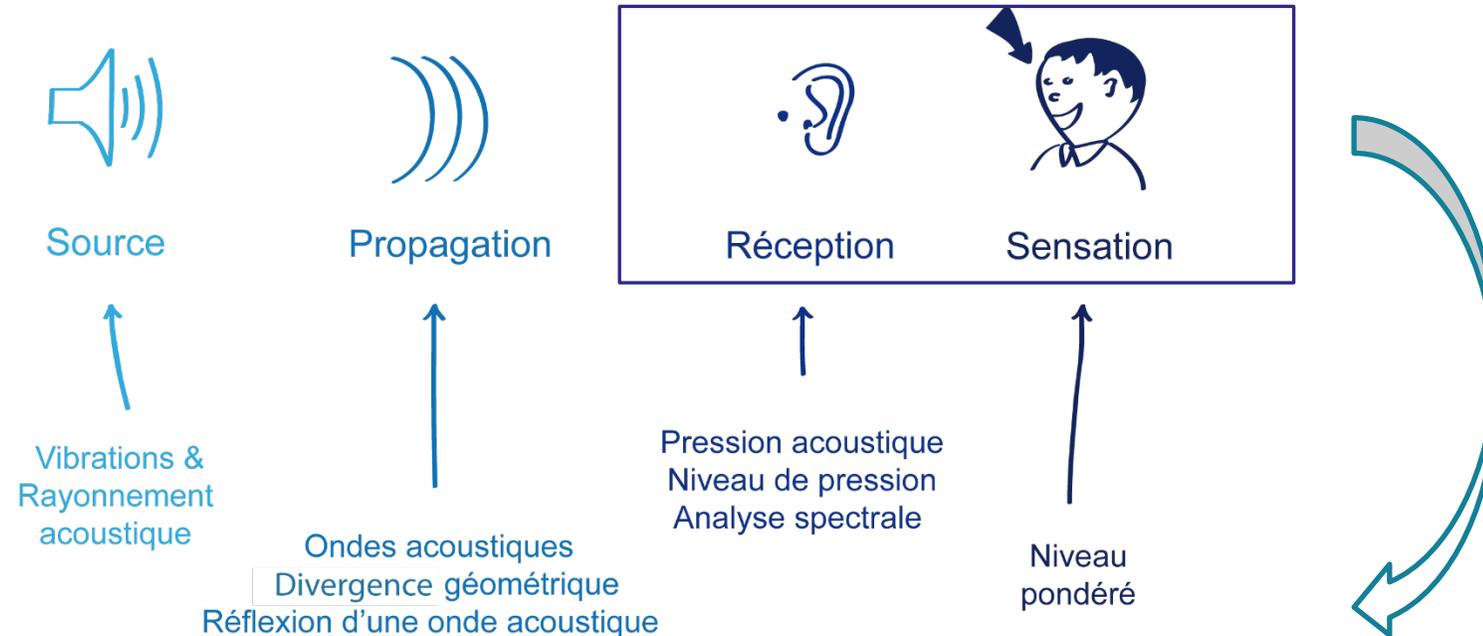
---

- **Organisation Mondiale de la Santé**

« Le bruit environnemental est défini comme le bruit émis par toutes les sources, à l'exception de celles en milieu de travail. Il inclut donc le bruit provenant :

- des transports (routiers, ferroviaires et aériens)
- des industries,
- des commerces,
- des chantiers de construction,
- des activités de loisirs,
- ainsi que le bruit provenant de l'intérieur des logements et du voisinage. »

# De l'émission à la perception



Le bruit qui est au départ **une onde acoustique** (physique), est transformée en **stimulus biologique** (réaction physiologique) pour enfin être **interprété par le système nerveux central**. Cela permet de bien saisir le rôle des processus mentaux pour les effets extra auditifs (neurosciences, sciences cognitives, psychoacoustique).

# Définition de la santé

---

- **Organisation Mondiale de la Santé (1946)**

« La santé est un état de complet bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité. »

# Effets reconnus du bruit sur la santé

## Lignes directrices du bruit dans l'environnement (OMS 2018)

	Route	Fer	Aérien
Maladies cardio-vasculaires	++	Manque d'études	Manque d'études /+
Perturbations du sommeil	++	++	++
Gêne	++	++	++
Retards dans les apprentissages	Manque d'études	Manque d'études	++



# Définition de la gêne due au bruit

---

- **Organisation Mondiale de la Santé**

« Une sensation de désagrément, de déplaisir provoquée par un facteur de l'environnement dont l'individu (ou le groupe) reconnaît ou imagine le pouvoir d'affecter sa santé. »

- **Co-déterminants de la gêne**

- **Facteurs acoustiques** : intensité, émergence, répétitivité, durée, spectre
- **Facteurs contextuels** : quartier, logement...
- **Facteurs individuels** : facteurs sociodémographiques (âge, sexe, niveau d'étude, dépendance par rapport à la source de bruit, statut d'occupation des lieux, usage de la source,...), et facteurs d'attitude (sensibilité au bruit, peur de la source, capacité à faire face, confiance dans les pouvoirs publics,...).

- **Conséquences** : irritation, fatigue puis épuisement et souffrances psychophysiologiques pouvant à leur tour susciter des réponses négatives telles que la colère, l'agressivité.



# Chiffres-clés en Europe

**1 million d'années de vie en bonne santé perdues chaque année en Europe à cause du bruit (OMS, 2011)**

Perturbations du sommeil

Effets auditifs



22 000 années

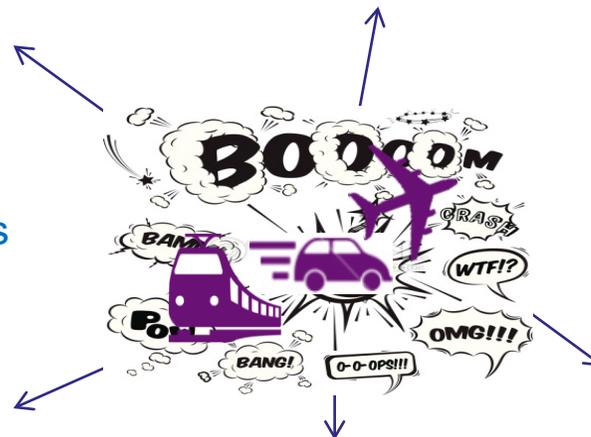


903 000 années

Effets sur les performances et apprentissage chez les enfants



45 000 années



Gêne



654 000 années



61 000 années

Pathologies cardiovasculaires

# Effets de plus en plus documentés

---

- **Systeme cardiovasculaire**
  - Élévation de la pression artérielle
  - Hypertension
  - Accident vasculaire cérébral
  - Infarctus du myocarde
- **Systeme métabolique**
  - Diabète de type 2
  - Marqueurs de l'obésité

# Effets insuffisamment investigués

---

- Système endocrinien (cortisol et catécholamines)
- Troubles psychologiques (anxiété, dépression)
- Troubles psychiatriques
- Maladies neurodégénératives (Parkinson, Alzheimer...)
- État de santé perçu, bien-être, qualité de vie
- Effets à long terme des troubles du sommeil liés au bruit
- Issues défavorables de la grossesse, développement fœtal, croissance
- Cancers



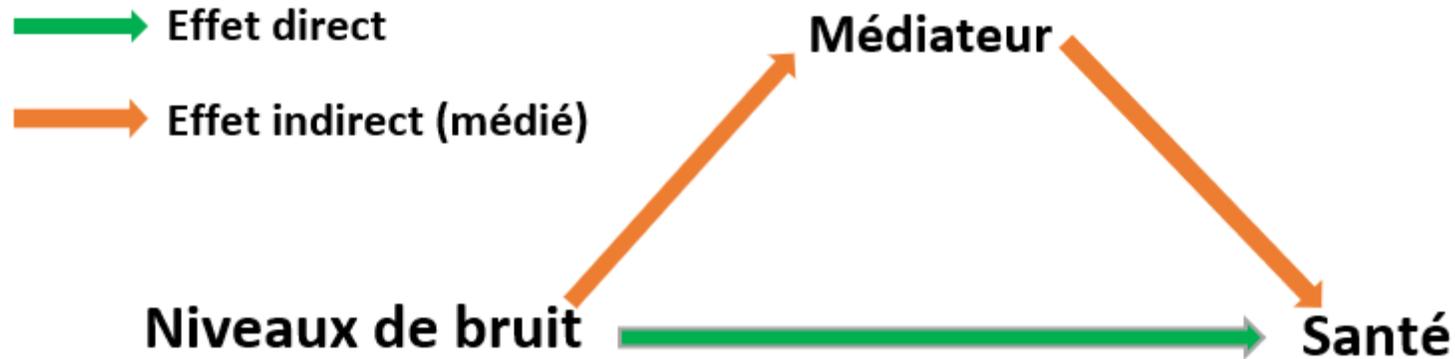
# Médiateur et modérateur

# Médiateur

---

## ■ Médiateur

Variable intermédiaire par laquelle les niveaux de bruit sont susceptibles d'affecter la santé



## ■ Potentiels médiateurs

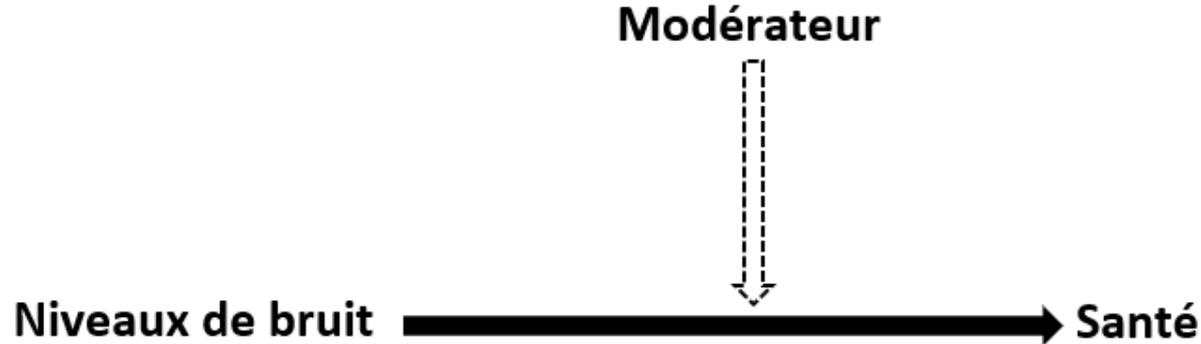
- Gêne due au bruit (Schreckenberg et al. 2010)
- Perturbations du sommeil (Basner and McGuire 2018 ; Léger et al. 2019)
- Stress (Babisch et al. 2002 ; Zorn et al. 2017 ; Baudin et al. 2019)

# Modérateur

---

- **Modérateur**

Variable qui interagit avec les niveaux de bruit en modifiant la force et/ou le sens de l'association entre les niveaux de bruit et les effets néfastes sur la santé



- **Potentiels modérateurs**

Certains auteurs ont fait l'hypothèse que la sensibilité au bruit module l'effet du bruit sur les événements de santé (Kishikawa et al. 2009 ; Shepherd et al. 2010 ; Baliatsas et al. 2016)

*Certaines personnes ayant des caractéristiques particulières seraient plus exposées aux effets néfastes du bruit sur la santé ?*

# Méthodes statistiques

---

- Approches statistiques **classiques** (Baron et Kenny 1986)
- Approches en **inférence causale**



# DEBATS

## Discussion sur les Effets du Bruit des Aéronefs Touchant la Santé (2009-202?)

<http://debats-avions.ifsttar.fr>



# Objectifs de DEBATS

---



- **Mieux connaître et mieux quantifier les effets du bruit des avions sur la santé**
  - Adopter une approche globale en caractérisant les états de santé à la fois sur le plan physique et mental mais aussi en termes de gêne ressentie

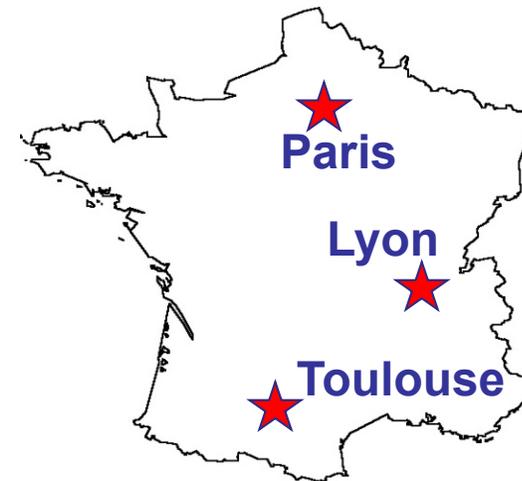




# Méthodologie

- **Programme de recherche en cours (2009-202?) auprès des résidents autour de trois aéroports français**

- Paris-Charles de Gaulle
- Toulouse-Blagnac
- Lyon Saint-Exupéry

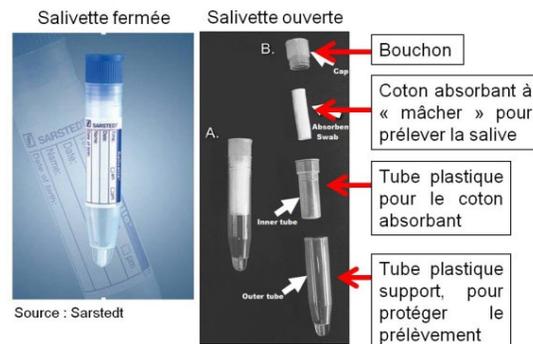


- **Trois études correspondant à trois méthodologies**

- une étude écologique
- une étude longitudinale (1244 participants inclus en 2013 et suivis en 2015 et 2017)
- une étude « sommeil »

# Étude longitudinale

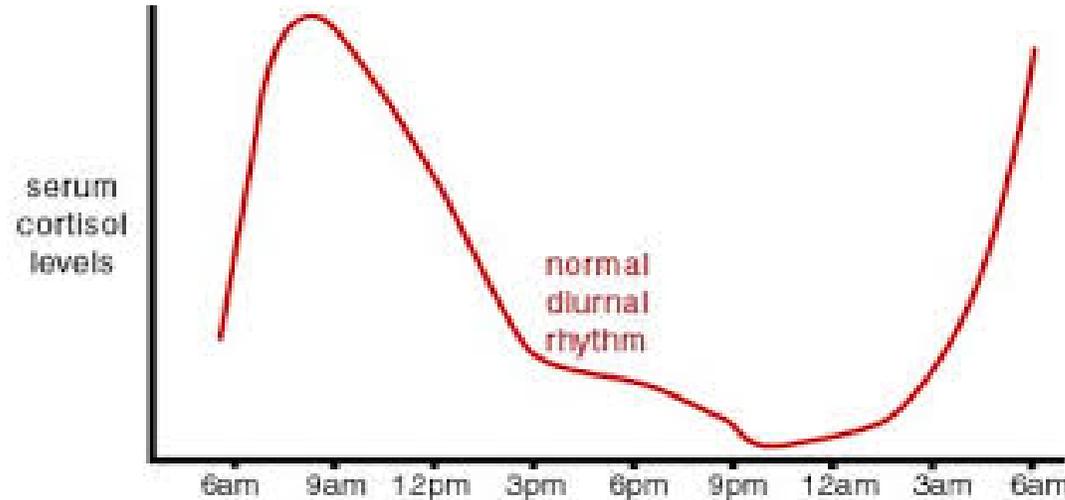
- **Effets sanitaires recueillis par questionnaire**
  - Troubles du sommeil
  - Hypertension et pathologies cardiovasculaires
  - Troubles psychologiques
  - Gêne et ses co-déterminants
- **Effets sanitaires mesurés**
  - Pression artérielle et fréquence cardiaque
  - Cortisol salivaire





# Cortisol

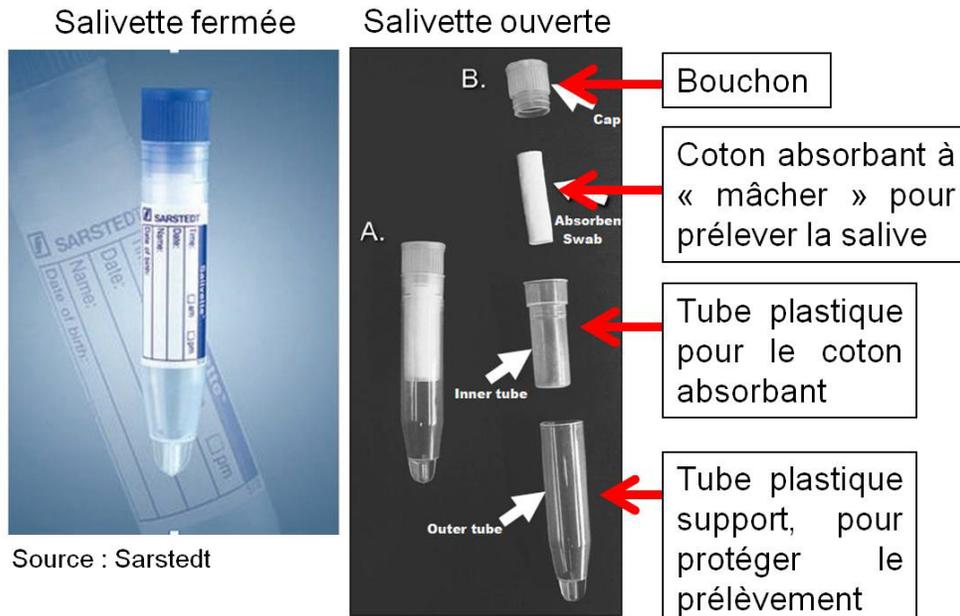
- **Hormone** sécrétée par les glandes surrénales
- **Marqueur des états de stress**
- **Essentiel au processus métabolique de l'organisme** : modification de sa sécrétion néfaste à l'organisme
- **Cycle circadien** : maximum entre 6h - 8h et minimum vers minuit



- **Trois méthodes de dosage** : prélèvement d'urine, sang ou salive

# Mesures du cortisol salivaire

- Kit de prélèvement de salive fourni aux participants
- Deux prélèvements par participant : un au lever et un au coucher
- Consignes de prélèvement
  - Renseignement obligatoire de la **date et de l'heure** pour chacun des prélèvements
- Analyse des prélèvements (laboratoire biochimie du centre hospitalier Lyon-Sud)



Source : Sarstedt





# Résultats

---

- **Dégradation de l'état de santé perçu** chez les hommes uniquement (Baudin et al. 2021 ; Kodji et al. 2023)
- **Augmentation de la gêne**, associée également à des facteurs non acoustiques (Lefèvre et al. 2020)
- **Augmentation des troubles psychologiques avec la gêne** due au bruit des avions (Baudin et al. 2018)
- **Dégradation de la qualité subjective et objective du sommeil** (Nassur et al. 2017, 2018, 2019)
- **Diminution de la variation horaire du cortisol salivaire** au cours de la journée (Lefèvre et al. 2017 ; Baudin et al. 2019)
- **Augmentation du risque d'hypertension** chez les hommes uniquement (Evrard et al. 2017 ; Kourieh et al. 2022)

## DEBATS

Discussion sur les Effets du Bruit des Aéronefs Touchant la Santé



[Accueil](#)

[Pourquoi ?](#)

[Comment ?](#)

[Qui sommes-nous ?](#)

[Notre recherche](#)

[Financement](#)

- [Actualités](#)
- [Emploi](#)
- [Lexique](#)
- [Publications](#)
- [Espace partenaires](#)

### DEBATS en bref

L'exposition au bruit des avions pourrait avoir des conséquences importantes pour la santé. Toutefois, celles-ci ont été insuffisamment évaluées en France. Il n'existe pas à notre connaissance dans notre pays de large étude prospective permettant de mesurer un effet de l'exposition au bruit des avions sur la santé des populations exposées. C'est la raison pour laquelle une étude scientifique appelée DEBATS (Discussion sur les Effets du Bruit des Aéronefs Touchant la Santé) a été lancée en 2012 sur ce sujet.

En apportant une connaissance élargie et approfondie de la situation sanitaire française résultant de l'exposition au bruit des avions, DEBATS permettra de répondre à la demande des populations riveraines des zones aéroportuaires en France. Il permettra également à l'avenir de mieux orienter les actions de prévention des nuisances environnementales à proximité des aéroports.

DEBATS a été confié à l'[Ifsttar](#) (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux) par le Ministère en charge de la Santé ([DGS](#)) et l'Autorité de Contrôle des Nuisances Aéroportuaires ([Acnusa](#)). Il est financé par le Ministère en charge de la Santé, le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie ([MEDDE](#)), et par la Direction Générale de l'Aviation Civile ([DGAC](#)).

DEBATS a reçu l'agrément du Comité Consultatif sur le Traitement de l'Information en matière de Recherche dans le domaine de la Santé ([CCTIRS](#)), et de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés ([CNIL](#)).

[Contacts](#)

[Mentions légales](#)



# **Application des recommandations de Baron et Kenny (1986)**

# Stage de M2 de Minon Kodji (2021)

---

## ▪ **Objectif**

Explorer les potentiels rôles de médiation et de modération de la gêne due au bruit des avions et de la sensibilité au bruit dans la relation entre les niveaux de bruit et l'état de santé perçu

## ▪ **Contexte**

- **Rôle de médiateur et/ou modérateur de la gêne due au bruit** dans la relation entre niveaux de bruit et état de santé perçu, qualité de vie  
(Héritier et al. 2014 ; Welch et al. 2013 ; Schreckenberg et al. 2010)
- **Rôle de modérateur de la sensibilité au bruit** dans la relation entre niveaux de bruit et qualité de vie  
(Welch et al. 2013 ; Schreckenberg et al. 2010)

# Matériel : DEBATS

---

## ▪ **État de santé perçu (SF-36)**

Dans l'ensemble, pensez-vous que votre santé est :

Excellente	}	Bon
Bonne		
Médiocre	}	Mauvais
Mauvaise		

## ▪ **Gêne due au bruit des avions**

En pensant aux 12 derniers mois, lorsque vous êtes ici chez vous, dans quelle mesure le bruit des avions vous gêne-t-il ?

Extrêmement	}	Fortement gêné
Beaucoup		
Moyennement	}	Pas fortement gêné
Légèrement		
Pas du tout		

## ▪ **Sensibilité au bruit**

En ce qui concerne le bruit en général, estimez-vous que par rapport aux personnes de votre entourage vous êtes :

Beaucoup moins sensible	}	Fortement sensible
Moins sensible		
Aussi sensible	}	Pas fortement sensible
Plus sensible		
Beaucoup plus sensible		

# Méthodes statistiques

---

- **Modèle linéaire généralisé à intercept aléatoire (analyse longitudinale)**

$$\text{Logit} \left( P(SRHS_{i,t} = 1 / X_{i,t}, \alpha_i) \right) = \alpha_i + \beta \cdot X_{i,t}$$

$SRHS_{i,t}$  : l'état de santé perçu pour le participant  $i$  à l'instant  $t$

$X_{i,t}$  : un vecteur de variables explicatives qui varient en fonction des individus et du temps

$\beta$  : un vecteur d'effets associés à  $X_{i,t}$

$\alpha_i \sim N(\alpha, \sigma_\alpha^2)$  : une constante aléatoire

Tous les modèles sont ajustés sur l'âge, le revenu du foyer, l'activité professionnelle, le nombre de personnes du foyer, la consommation de tabac et le pays de naissance

# Méthodes statistiques

---

- Test du rôle de médiation d'un facteur X (Barron et Kenny 1986)

$$M1 : \text{Logit}(P(\mathbf{X}_i = 1/\text{bruit}_i, C_i)) = \alpha_i + \beta.\text{bruit}_i + \theta.C_i$$

$$M2 : \text{Logit}(P(\text{SRHS}_i = 1/\text{bruit}_i, \mathbf{X}_i, C_i)) = \alpha_i + \beta.\text{bruit}_i + \delta.\mathbf{X}_i + \theta.C_i$$

$$M3 : \text{Logit}(P(\text{SRHS}_i = \text{bruit}_i, C_i)) = \alpha_i + \beta.\text{bruit}_i + \theta.C_i$$

$\text{SRHS}_i$  : état de santé perçu

$\text{bruit}_i$  : niveau de bruit

$C_i$  : variables de confusion

$\mathbf{X}_i$  : potentiel médiateur (gêne due au bruit des avions ou sensibilité au bruit)

# Méthodes statistiques

---

- **Test du rôle de médiation d'un facteur X (Barron et Kenny, 1986)**
  - Les niveaux de bruit des avions sont associés au médiateur potentiel (M1)
  - Le médiateur potentiel est associé à la dégradation de SRHS après contrôle des niveaux de bruit des avions (M2)
  - L'association entre les niveaux de bruit des avions et la dégradation de SRHS est plus faible après contrôle du médiateur (c'est-à-dire plus faible en M2 qu'en M3)

# Méthodes statistiques

---

- Test du rôle de modération d'un facteur X

$$M4 : \text{Logit}(P(SRHS_i = 1/\text{bruit}_i, \mathbf{X}_i, C_i)) = \alpha_i + \beta \cdot \text{bruit}_i + \delta \cdot \mathbf{X}_i + \theta \cdot C_i + \sigma \cdot \text{bruit}_i * \mathbf{X}_i$$

$SRHS_i$  : état de santé perçu

$\text{bruit}_i$  : niveau de bruit

$C_i$  : variables de confusion

$\mathbf{X}_i$  : potentiel modérateur (gêne due au bruit des avions ou sensibilité au bruit)

# Caractéristiques de la population

	Inclusion en 2013 (N=1244)		Suivi en 2015 (N=992)		Suivi en 2017 (N= 811)	
	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme
<b>N</b>	695	549	549	443	438	373
<b>État de santé perçu: n (%)</b>						
mauvais	109 (16)	81 (15)	88 (16)	61 (14)	63 (14)	49 (13)
bon	586 (84)	466 (85)	461 (84)	382 (86)	375 (86)	324 (87)
<b>Gêné par bruit avion: n (%)</b>						
fortement gêné	126 (18)	99 (18)	145 (26)	103 (23)	120 (27)	81 (22)
pas fortement gêné	569 (82)	448 (82)	404 (74)	340 (77)	318 (73)	292 (78)
<b>Sensibilité au bruit: n (%)</b>						
fortement sensible	234 (34)	135 (25)	197 (36)	112 (25)	147 (34)	96 (26)
pas fortement sensible	459 (66)	405 (75)	352 (64)	331 (75)	291 (66)	277 (74)
<b>Niveau de bruit <math>L_{den}</math> (dB(A))</b>						
quantiles (5% ; 50% ; 95%)	(44 ; 55 ; 63 )	(44 ; 53 ; 62 )	(44 ; 54 ; 62 )	(44 ; 52 ; 62 )	(44 ; 54 ; 62 )	(44 ; 52 ; 62 )
<b>Age</b>						
quantiles (5% ; 50% ; 95%)	(24 ; 50 ; 76 )	(27 ; 51 ; 74 )	(27 ; 54 ; 79 )	(30 ; 54 ; 75 )	(29 ; 57 ; 80 )	(34 ; 56 ; 77 )

# Rôle de médiateur de la gêne due au bruit

	Femmes			Hommes		
Modèle M1	OR <sup>1</sup>	IC 95%		OR <sup>1</sup>	IC 95%	
Gêne due au bruit	<b>2,69</b>	<b>2,01</b>	<b>3,61</b>	<b>2,78</b>	<b>1,97</b>	<b>3,92</b>

<sup>1</sup>Pour une augmentation de 10 dBA des niveaux de bruit

➤ La gêne pourrait être un médiateur

# Rôle de médiateur de la gêne due au bruit

		Femmes			Hommes		
Modèle M2		OR	IC 95%		OR	IC 95%	
	Niveaux de bruit <sup>1</sup>	0,95	0,69	1,30	1,36	0,94	1,98
	Gêne due au bruit	1,35	0,92	1,98	1,57	0,98	2,44
Modèle M3							
	Niveaux de bruit <sup>1</sup>	1,00	0,73	1,37	<b>1,47</b>	<b>1,02</b>	<b>2,11</b>

<sup>1</sup>Pour une augmentation de 10 dBA des niveaux de bruit

# Rôle de médiateur de la gêne due au bruit

Modèle		Femmes			Hommes		
		OR	IC 95%		OR	IC 95%	
Modèle M2	Niveaux de bruit <sup>1</sup>	0,95	0,69	1,30	1,36	0,94	1,98
	Gêne due au bruit	1,35	0,92	1,98	1,57	0,98	2,44
Modèle M3							
	Niveaux de bruit <sup>1</sup>	1,00	0,73	1,37	1,47	1,02	2,11

<sup>1</sup>Pour une augmentation de 10 dBA des niveaux de bruit

➤ Rôle de médiateur de la gêne due au bruit des avions  
chez les hommes

# Rôle de modérateur de la gêne due au bruit

Modèle M4		Pas fortement gênés			Fortement gênés			p-valeur
		OR <sup>1</sup>	IC 95%		OR <sup>1</sup>	IC 95%		
<b>Femmes</b>	N	569			126			
	Niveaux de bruit	0,91	0,64	1,51	1,06	0,57	1,31	0,67
<b>Hommes</b>	N	448			99			
	Niveaux de bruit	1,36	0,89	2,07	1,37	0,64	2,91	0,99

<sup>1</sup>Pour une augmentation de 10 dBA des niveaux de bruit

➤ **Pas de rôle de modérateur de la gêne due au bruit des avions ni chez les femmes ni chez les hommes**

# Rôle de modérateur de la sensibilité au bruit

Modèle M4		Pas fortement sensibles			Fortement sensibles			p-valeur
		OR <sup>1</sup>	IC 95%		OR <sup>1</sup>	IC 95%		
<b>Femmes</b>	N	459			234			
	Niveaux de bruit	1,05	0,70	1,56	0,94	0,56	1,57	0,74
<b>Hommes</b>	N	405			135			
	Niveaux de bruit	1,39	0,90	2,14	1,84	0,92	3,70	0,50

<sup>1</sup>Pour une augmentation de 10 dBA des niveaux de bruit

- Pas de rôle de modérateur de la sensibilité au bruit chez les femmes
- Rôle de modérateur de la sensibilité au bruit chez les hommes

# Conclusions

---

- **Gêne due au bruit des avions : médiateur** dans la relation entre niveaux de bruit et état de santé perçu
- **Sensibilité au bruit : modérateur** dans la relation entre niveaux de bruit et état de santé perçu

➤ **Ces résultats confirment ceux des études antérieures  
qui ne sont pas nombreuses**

Kodji M, Lanoy E, Giorgis-Allemand L, Laumon B, Evrard AS. The role of noise annoyance and noise sensitivity in the effect of aircraft noise on self-reported health: The results of the DEBATS longitudinal study in France. *Noise Health* 2023



# **Application des approches en inférence causale**

# Deux types d'approche

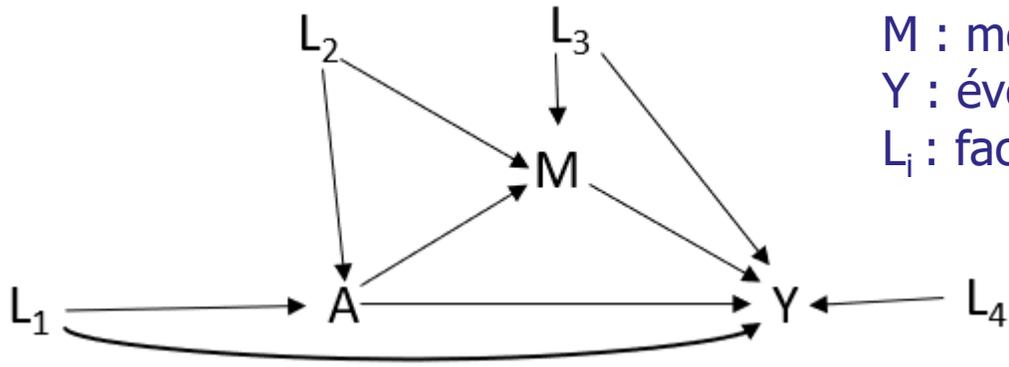
---

- **Approches graphiques à travers les DAG (Directed Acyclic Graph)**  
(Pearl 1995 ; Spirtes et al. 2000 ; Pearl et al. 2001)
- **Approches structurales à travers les variables contrefactuelles**  
(Robins 1986 ; Robins et al. 2000)

Ces approches établissent les conditions nécessaires pour identifier les effets causaux à partir de données observationnelles

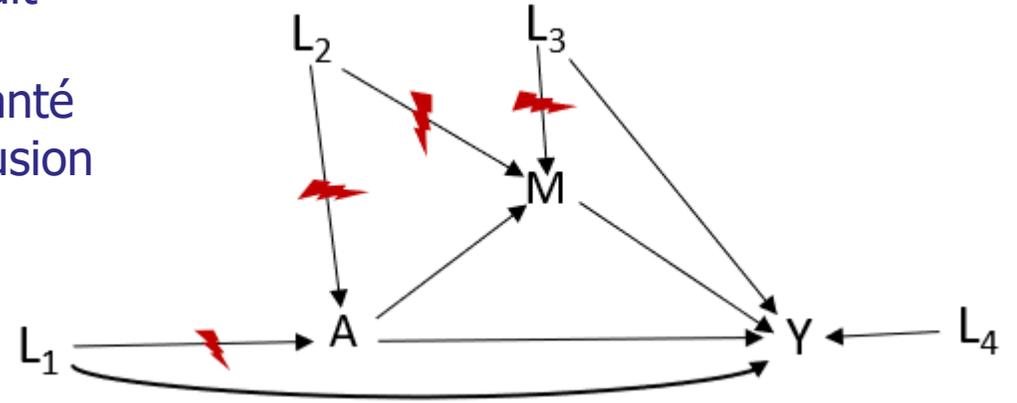
# Principe des méthodes en inférence causale

## Situation observationnelle



A : exposition au bruit  
M : médiateur  
Y : évènement de santé  
L<sub>i</sub> : facteurs de confusion

## Méthodes causales



### Approche classique :

- Prise en compte des facteurs de confusion par ajustement dans les modèles
- Insuffisant dans le cas d'études longitudinales complexes
- Ne garantit pas une interprétation causale

### Inférence causale :

- Contrôler des facteurs de confusion
- Rapprocher l'étude observationnelle de l'étude interventionnelle randomisée
- Formuler une interprétation causale

# Approches contrefactuelles

---

## ▪ Définition des effets causaux à partir des variables contrefactuelles

Soit  $A$  binaire : exposé ( $A = 1$ ) *versus* non exposé ( $A = 0$ )

On définit :

- La variable contrefactuelle  $Y_a$  : valeur de  $Y$  si  $A$  avait été fixé à  $a$ , avec  $a = \{0; 1\}$
- La variable contrefactuelle  $Y_{am}$  : valeur de  $Y$  si  $A$  avait été fixé à  $a$  et  $M$  à  $m$

$$\text{Effet total} : \mathbb{E} [Y_{1M_1}] - \mathbb{E} [Y_{0M_0}]$$

$$\text{Effet direct} : \mathbb{E} [Y_{1M_0}] - \mathbb{E} [Y_{0M_0}]$$

$$\text{Effet indirect} : \mathbb{E} [Y_{1M_1}] - \mathbb{E} [Y_{1M_0}]$$

Toutes les variables contrefactuelles ne sont pas observées.



Ces effets causaux ne sont pas calculables à partir des données observées.

# Approches contrefactuelles

---

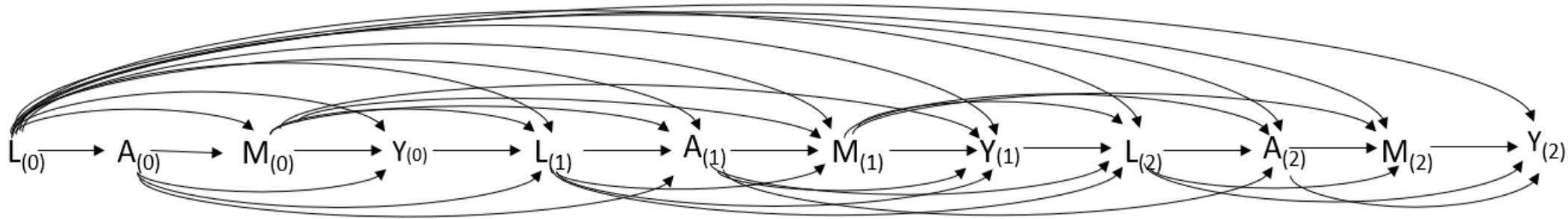
- **Hypothèses d'identification**

- Tous les facteurs de confusion  $L_1$  ,  $L_2$  et  $L_3$  sont mesurés
- Absence de facteur de confusion entre le médiateur et l'évènement de santé affecté par l'exposition



Sous ces hypothèses, les effets causaux peuvent être estimés à partir des données observées.

# Médiation causale dans une étude longitudinale



$A$  est l'exposition,  $L$  les facteurs de confusion,  $Y$  l'outcome,  $M$  le médiateur

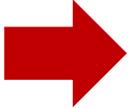
## ▪ Hypothèses d'identification des effets causaux (Pearl 2001 ; Vanderweele 2015)

À chaque temps de mesure  $t$  :

- i) l'effet de l'exposition  $A(t)$  sur l'outcome  $Y(t)$  n'est pas confondu en conditionnant sur l'historique de l'exposition, du médiateur et des facteurs de confusion
- ii) l'effet de l'exposition  $A(t)$  sur le médiateur  $M(t)$  n'est pas confondu en conditionnant sur l'historique de l'exposition, du médiateur et des facteurs de confusion
- iii) l'effet du médiateur  $M(t)$  sur l'outcome  $Y(t)$  n'est pas confondu en conditionnant sur l'historique de l'exposition, du médiateur et des facteurs de confusion
- iv) absence de facteurs de confusion dans la relation entre le médiateur et l'outcome affectés par les expositions antérieures

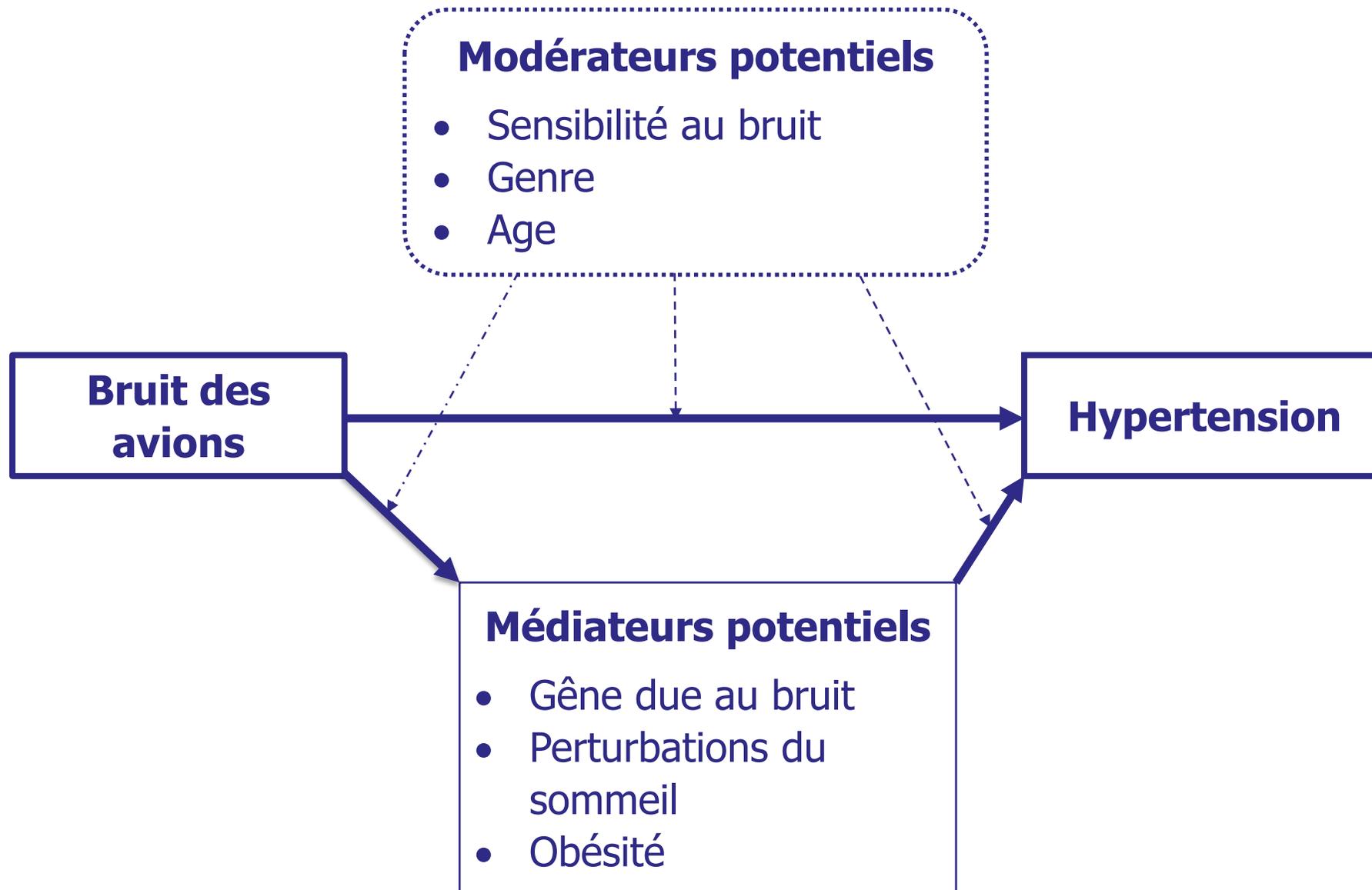
# Médiation causale dans une étude longitudinale

---

- Sous les hypothèses i-iv) , on peut estimer les effets causaux par **la mediation formula** (Pearl 2001)
  - Sous les hypothèse i-iii), méthode alternative : **la mediational g-formula** (VanderWeele and Tchetgen Tchetgen 2017)
-  Estimation de l'effet total, de l'effet direct et de l'effet indirect interventionnels à partir des approches semi-paramétriques (modèles marginaux structuraux) basées sur la **pondération par l'inverse de la probabilité d'exposition** ou IPTW (Inverse Probability of Treatment Weighting) (Robins et al. 2000)

**Sujet de thèse de Minon Kodji (2021-2024) : Étude du rôle de médiation et de modération de certains facteurs dans la relation entre niveaux de bruit et événements néfastes sur la santé.**

# Perspectives



**Anne-Sophie EVRARD**

[anne-sophie.evrard@univ-eiffel.fr](mailto:anne-sophie.evrard@univ-eiffel.fr)

