SCUOLA DI SPECIALIZZAZIONE IN FISICA MEDICA

Modelli biocinetici e dosimetrici per incorporazione di radionuclidi

Modellistica dei sistemi biologici.
Processi di trasporto e cinetiche fra compartimenti.
Sviluppo e uso di modelli biocinetici per l'incorporazione di radionuclidi
Modello sistemico, modello gastrointestinale ICRP 30
Modello del sistema respiratorio ICRP 30
Modello dosimetrico per l'osso ICRP 30, 70
Modelli biocinetici specifici per età ICRP 56, 67, 69.
Modelli biocinetici speciali, modello del ferro.
Modello embrione, feto, allattamento ICRP 88, 95.
Nuovo modello del sistema respiratorio ICRP 66 e riferimenti ICRP 71
Nuovo modello del tratto alimentare ICRP 100.

NECESSITA' DI UN NUOVO MODELLO DEL SISTEMA RESPIRATORIO DOPO ICRP 30

★ **La ricerca su deposizione, ritenzione, rilascio e translocazione in animali e nell'uomo è stata stimolata proprio a seguito dell'ICRP 30;**

★ **La critica maggiore è stata fatta sulla classificazione in D, W, Y, molti composti testati seguivano una clearance con tempi diversi da quelli indicati, (es**. ossido di plutonio è eliminato più lentamente di Y**);**

NECESSITA' DI UN NUOVO MODELLO DEL SISTEMA RESPIRATORIO DOPO ICRP 30

★ **La ricerca su deposizione, ritenzione, rilascio e translocazione in animali e nell'uomo è stata stimolata proprio a seguito dell'ICRP 30;**

★ **La critica maggiore è stata fatta sulla classificazione in D, W, Y, molti composti testati seguivano una clearance con tempi diversi da quelli indicati, (**es. ossido di plutonio è eliminato più lentamente di Y**);**

★ **Nella ICRP 30 non erano considerate misture di composti;**

★ **Trovati nuovi dati a seguito di studi per particelle submicrometriche (**es. radon**);**

segue NECESSITA' DI UN NUOVO MODELLO DEL SISTEMA RESPIRATORIO DOPO ICRP 30

★ **Si sviluppa l'attenzione verso l'esposizione del pubblico ai radionuclidi ambientali (notare che a partire da ICRP 30, lavoratore caucasico è difficilmente adattabile a membro della popolazione del mondo);**

★ **La dose raramente è uniforme es. elevata nell'epitelio bronchiale per inalazione radon, vedi cancro nei minatori esposti;** es. per **plutonio** il parenchima polmonare riceve dose maggiore dell'epitelio bronchiale e vi è quindi rischio cancro ai polmoni**, i tessuti linfatici ricevono più dose ma mostrano minor rischio di cancro.**

CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL NUOVO MODELLO HRTM ICRP 66, 1994

- **Incorporare le attuali conoscenze.**
- **Essere consistente con le caratteristiche morfologiche, fisiologiche radiobiologiche del tratto respiratorio.**
- Non essere più sofisticato di quanto necessario **per raggiunger gli obiettivi dosimetrici.**
- Essere adatto per lo sviluppo software **per il calcolo di dose rilevanti, a partire dalla conoscenza di parametri di misura immediata.**

CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL NUOVO MODELLO HRTM ICRP 66, 1994

- **Essere ugualmente utile per scopi di accertamento che per il calcolo di ALI (annual limit intake).**
- **Essere applicabile a tutti i membri della popolazione.**
- **Tener conto dell'influenza di fumo, inquinamento aria e malattie.**

Il modello può essere applicato anche per la deposizione e clearance di materiale non radioattivo.

Sviluppo del Modello HRTM ICRP 66 , 1994

Lo sviluppo del modello ICRP 66 consiste di SEI elementi.

1.MORFOLOGIA

2.FISIOLOGIA

3.RADIOBIOLOGIA

4.DEPOSIZIONE

5.CLEARANCE

6.DOSIMETRIA

Ognuno di questi elementi necessita di un certo numero di parametri.

Sviluppo del Modello HRTM ICRP 66 , 1994

Lo sviluppo del modello ICRP 66 consiste di SEI elementi, ognuno dei quali necessita la definizione di un certo numero di parametri.

1.MORFOLOGIA descrive la struttura e definisce alcuni parametri dimensionali.

2.FISIOLOGIA indica frequenze e volumi per inalazione ed esalazione, distinguendo fra lavoratori e membri della popolazione. A questi valori sono legati i depositi nel tratto respiratorio.

3.RADIOBIOLOGIA identifica tessuti e cellule con la loro sensibilità relativa per definire i punti principali del modello.

Sviluppo del Modello HRTM ICRP 66 , 1994

Lo sviluppo del modello ICRP 66 consiste di SEI elementi, ognuno dei quali necessita la definizione di un certo numero di parametri.

1.MORFOLOGIA descrive la struttura e definisce alcuni parametri dimensionali.

2.FISIOLOGIA indica frequenze e volumi per inalazione ed esalazione, distinguendo fra lavoratori e membri della popolazione. A questi valori sono legati i depositi nel tratto respiratorio.

3.RADIOBIOLOGIA identifica tessuti e cellule con la loro sensibilità relativa per definire i punti principali del modello.

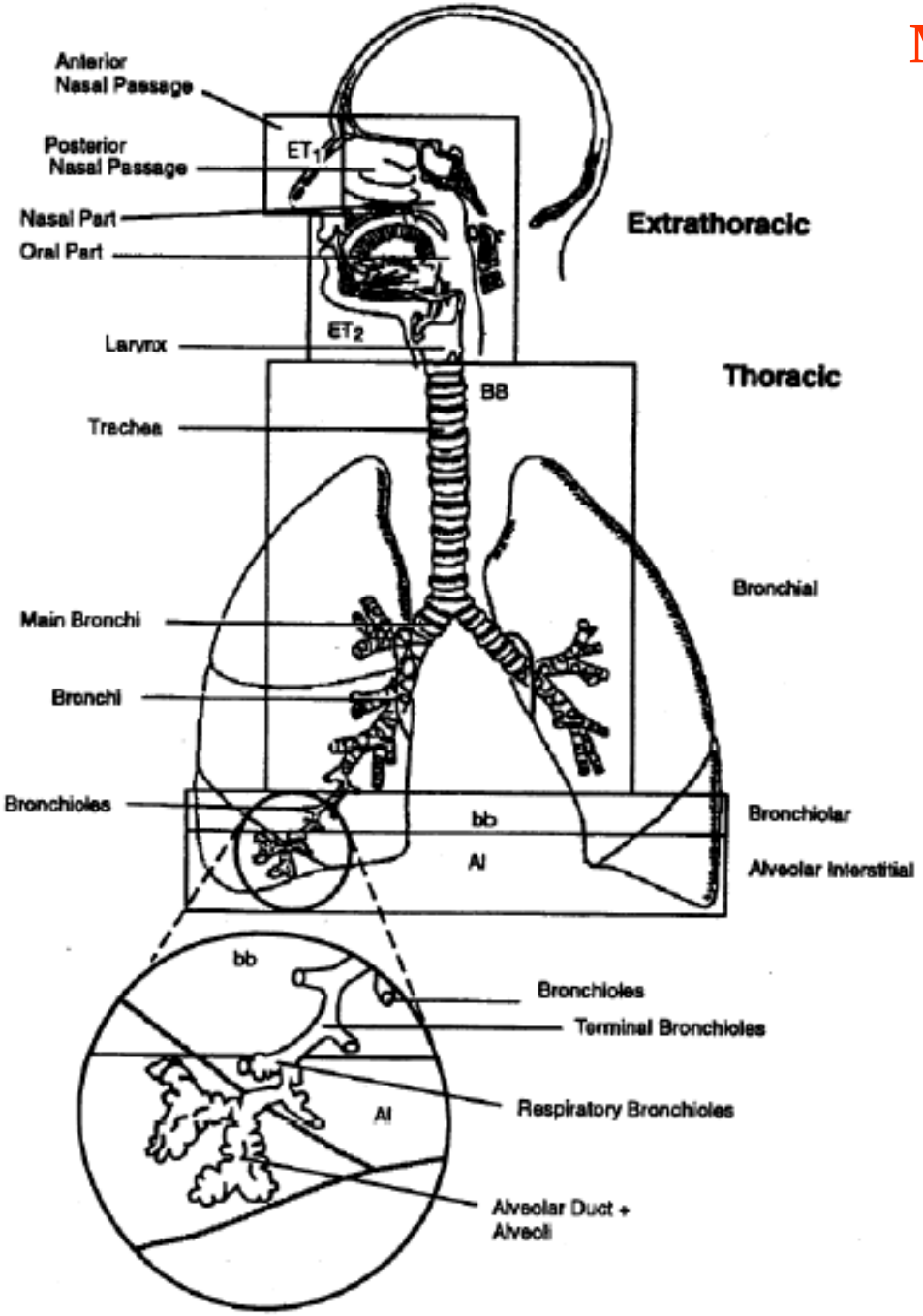
4.DEPOSIZIONE caratterizza la distribuzione iniziale in funzione delle regioni, età, genere e parametri fisiologici del soggetto.

5.CLEARANCE identifica le vie di rimozione del deposito per trasporto e assorbimento nella circolazione o trasporto verso il G.I.tract.

6.DOSIMETRIA valuta l'energia assorbita per unità di massa

MODELLO HRTM ICRP 66, 1994

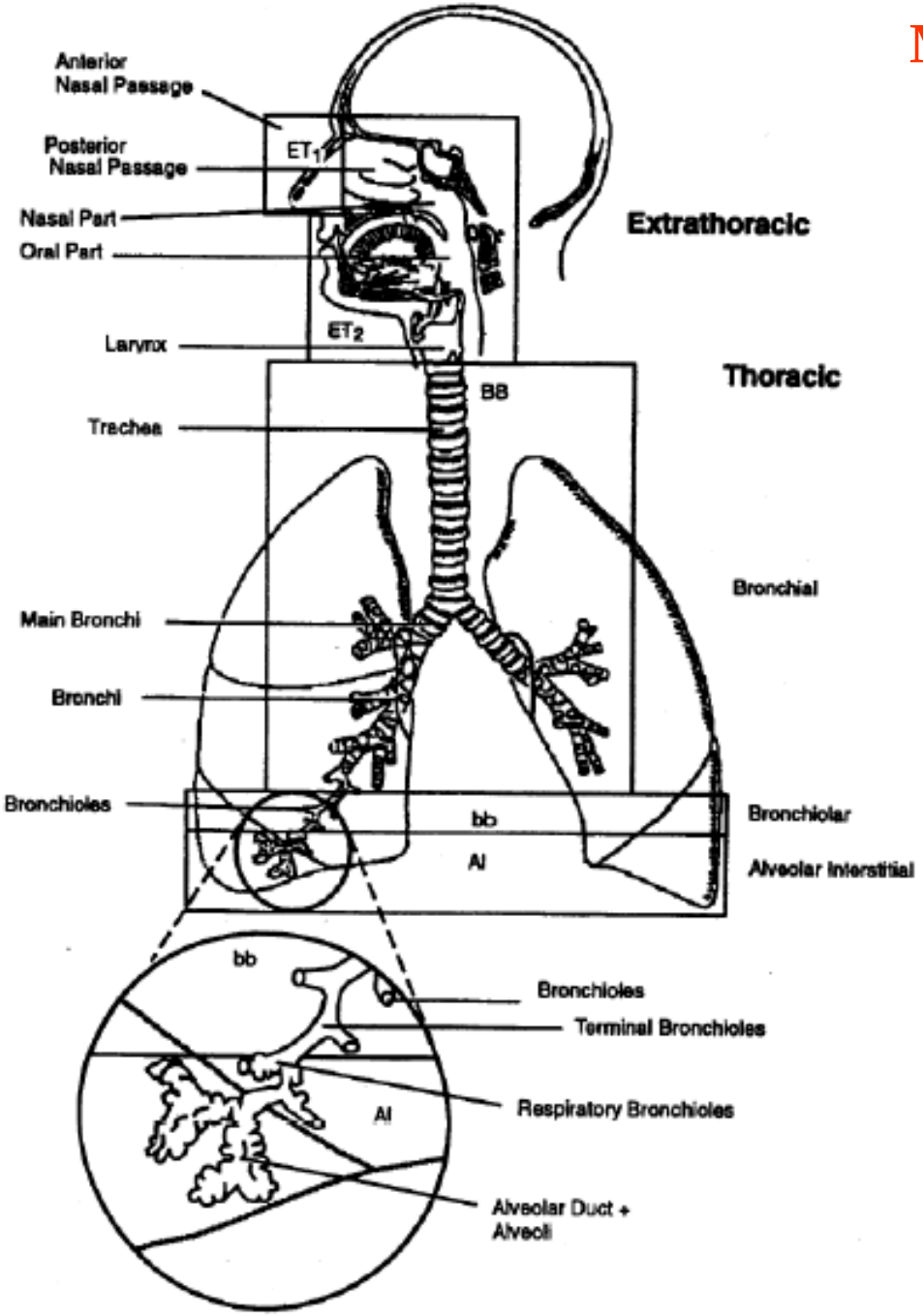
1.MORFOLOGIA



5 regioni anatomiche

- Le vie aeree extratoraciche ET :
  - ET1 passaggio nasale anteriore
  - ET2 passaggio nasale posteriore e orale, la faringe e la laringe.

MODELLO HRTM ICRP 66, 1994

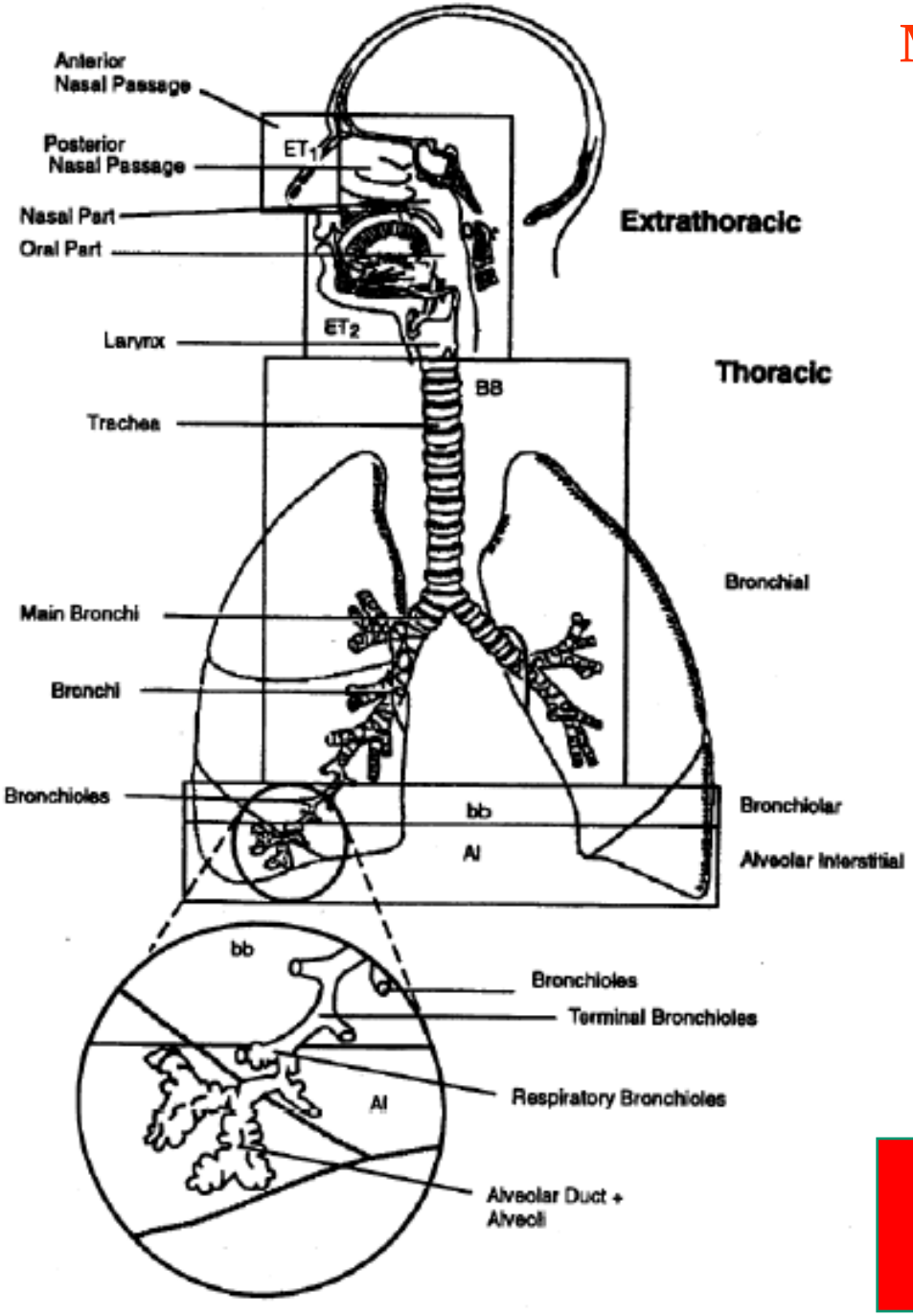


1.MORFOLOGIA

5 regioni anatomiche

- **Le vie aeree extratoraciche ET :**
  - **ET1 passaggio nasale anteriore**
  - **ET2 passaggio nasale posteriore e orale, la faringe e la laringe.**
- **Le regioni toraciche:**
  - **Bronchiale BB (trachea e bronchi principali).**
  - **Broncheolare bb.**
  - **Alveolare-Interstiziale AI (regione degli scambi gassosi, dotti alveolari, alveoli, tessuto connettivo interstiziale)**

MODELLO HRTM ICRP 66, 1994



1.MORFOLOGIA

5 regioni anatomiche

- **Le vie aeree extratoraciche ET :**
  - **ET1 passaggio nasale anteriore**
  - **ET2 passaggio nasale posteriore e orale, la faringe e la laringe.**
- **Le regioni toraciche:**
  - **Bronchiale BB (trachea e bronchi principali).**
  - **Broncheolare bb.**
  - **Alveolare-Interstiziale AI (regione degli scambi gassosi, dotti alveolari, alveoli, tessuto connettivo interstiziale)**

I tessuti linfatici sono associati con entrambe le aree extratoracica e toracica (LN_{ET} e LN_{TH})

MORFOLOGIA segue

★ **Le 4 regioni contengono tessuto linfatico o componenti di questo ed il fluido che si accumula nel tessuto connettivo interstiziale è raccolto nei capillari linfatici da cui fluisce verso i condotti linfatici e passa ai linfonodi.**

I tessuti linfatici sono associati con entrambe le aree extratoracica e toracica (LN_{ET} e LN_{TH}).

- **LN_{ET}** drena la regione ET
- **LN_{TH}** morfologicamente sta in BB, drena tutta la regione toracica: BB, bb, AI

MORFOLOGIA segue

★ **Molte particelle depositate nelle regioni ET, BB, bb sono rimosse per trasporto in superficie verso la faringe** però una frazione piccola è ritenuta nelle pareti (BB seq, bb seq, ET seq)

I compartimenti BBseq, bbseq, ETseq rappresentano questa frazione a ritenzione prolungata **per i depositi avvenuti nei rispettivi comparti.**

FISIOLOGIA

I parametri del respiro **determinano l'ammontare di radionuclidi inalato e dipendono dall'età, dimensioni del corpo, livello di esercizio fisico.**

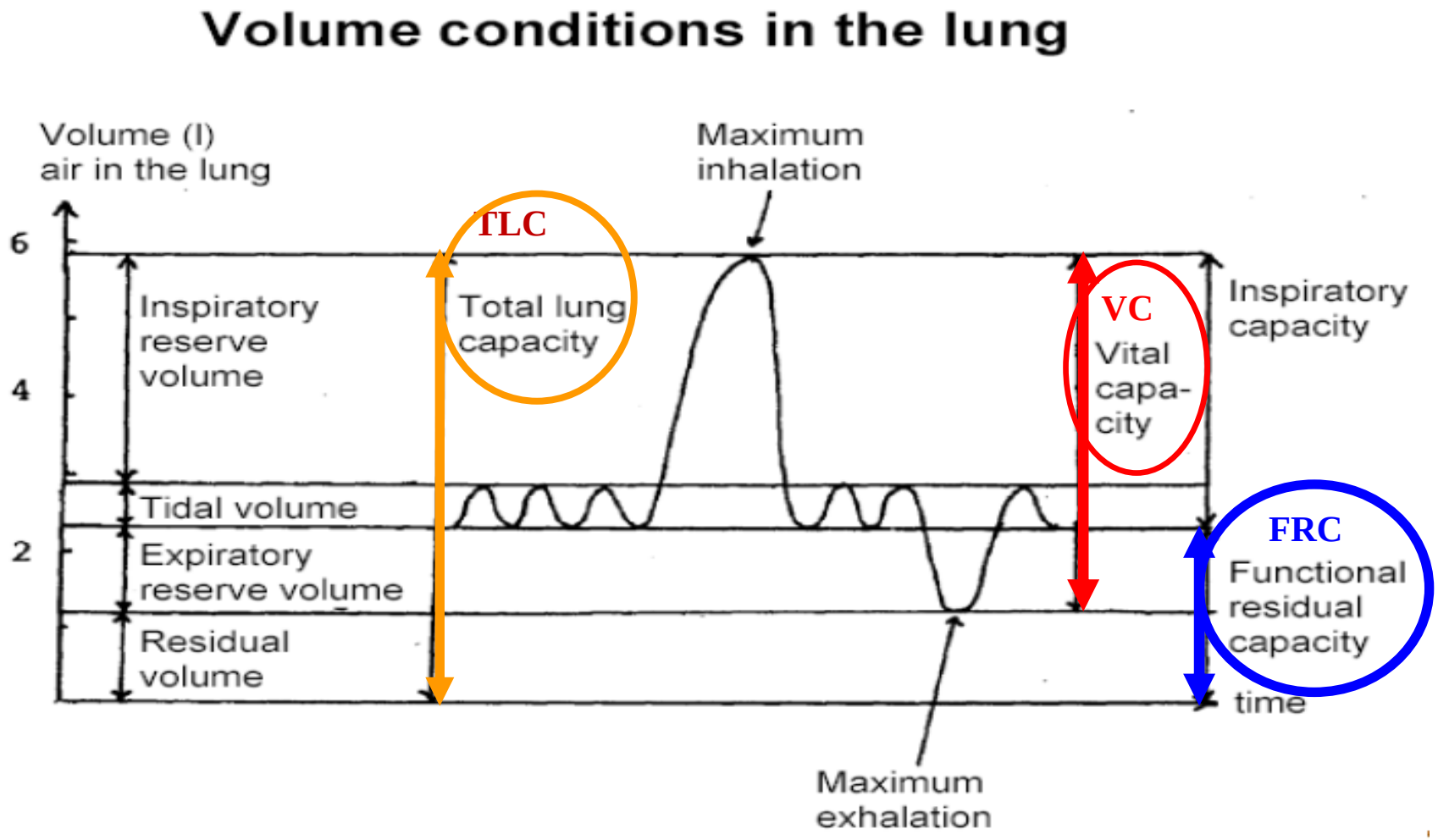
Vengono dati nella ICRP 66 i valori di riferimento di parametri respiratori per LAVORATORI (set coerente di valori per caucasici, uomo, donna) per membri della POPOLAZIONE (caucasico, età 3 mesi, 1y, 5y, 10y, 15 y, adulto) e esempi di variazione di valori respiratori per GRUPPI ETNICI.

FISIOLOGIA

Tab. - Parametri ventilazione, f_R = frequenza(min^{-1}), B = intensità ventilazione(m^3/h).							
Livello esercizio		**3 mesi**	**1 a**	**5 a**	**10 a(M)**	**15 a((M)**	**adult(M)/LAV**
Sonno	f_R min^{-1}	38	34	23	17	14	12
	B m^3h^{-1}	0.09	0.15	0.24	0.31	0.42	0.45
Seduto	f_R min^{-1}	----	36	25	19	15	12
	B m^3h^{-1}	----	0.22	0.32	0.38	0.48	0.54
Es. leggero	f_R min^{-1}	48	46	39	32	23	20
	B m^3h^{-1}	0.19	0.35	0.57	1.12	1.38	1.5
Es. pesante	f_R min^{-1}	---	---	---	44	36	26
	B m^3h^{-1}	---	---	---	2.22	2.92	3.0

SPIROMETRIA

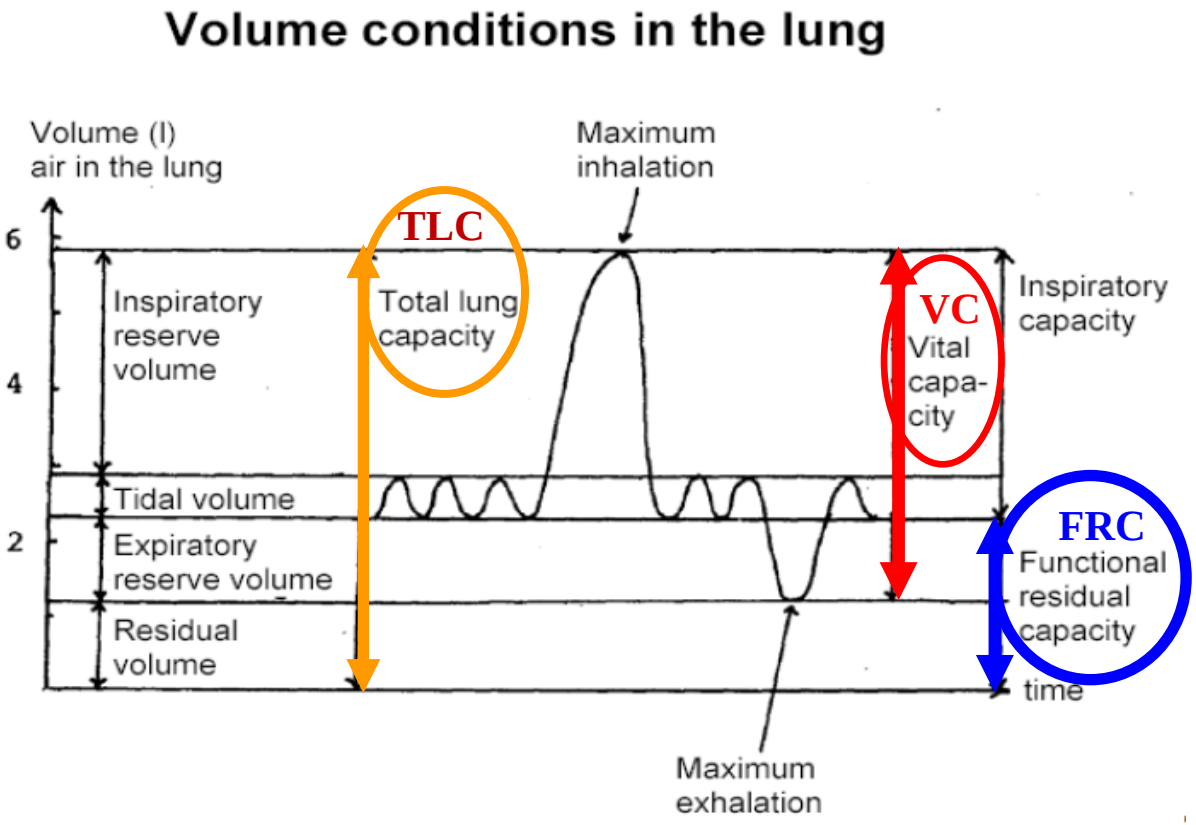
- misura delle variazioni di volume polmonare per valutare la funzionalità respiratoria



SPIROMETRIA

- misura delle variazioni di volume polmonare per valutare la funzionalità respiratoria

REFERENCE RESPIRATORY VALUES « FOR WORKERS »		
Lung volumes	**L**	
TLC	6.98	
FRC	3.30	
VC	5.02	
Ventilation rates	**L/min**	**m^3/h**
Sleep	7.5	0.45
Rest	9.0	0.54
L.exerc.	25	1.5
H.exerc.	50	3.0

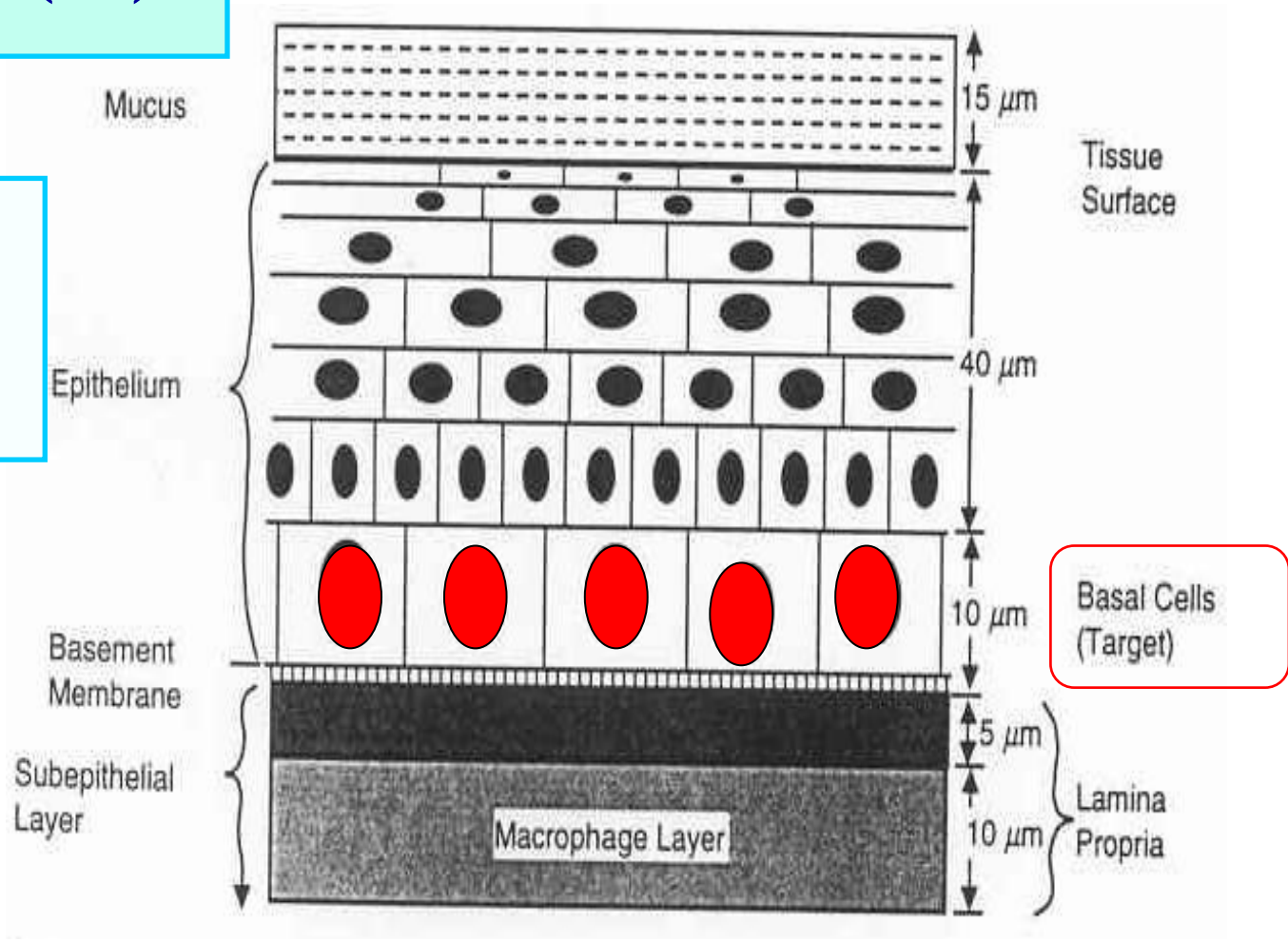


RADIOBIOLOGIA

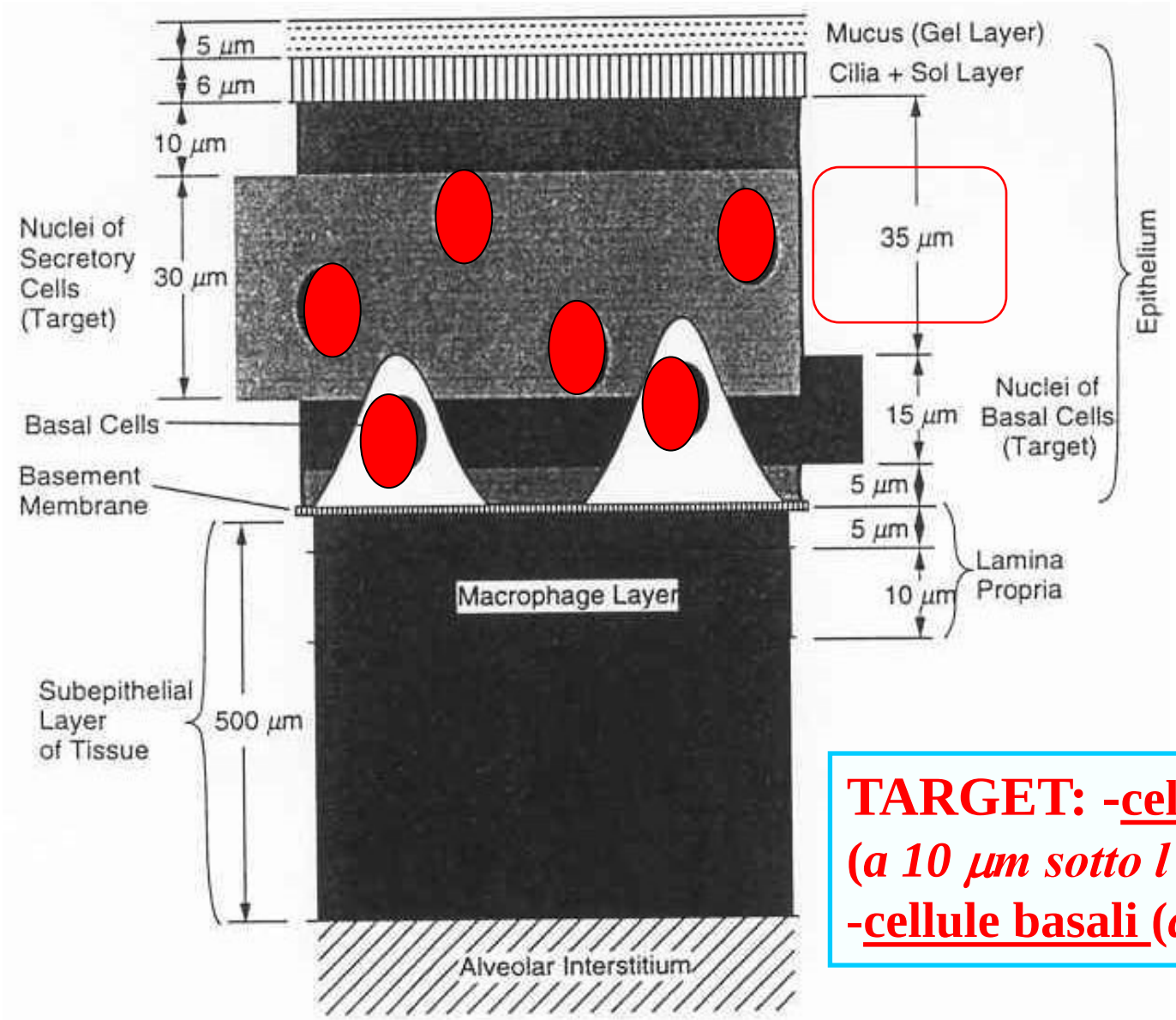
identificare i *tessuti a rischio* per l'interazione della radiazione, associando a ciascuno di questi una *specifica e propria radiosensibilità*.

Tessuti Extratoracici (ET)

TARGET: cellule basali dell' epitelio squamoso (profondità circa 40-50 μm).

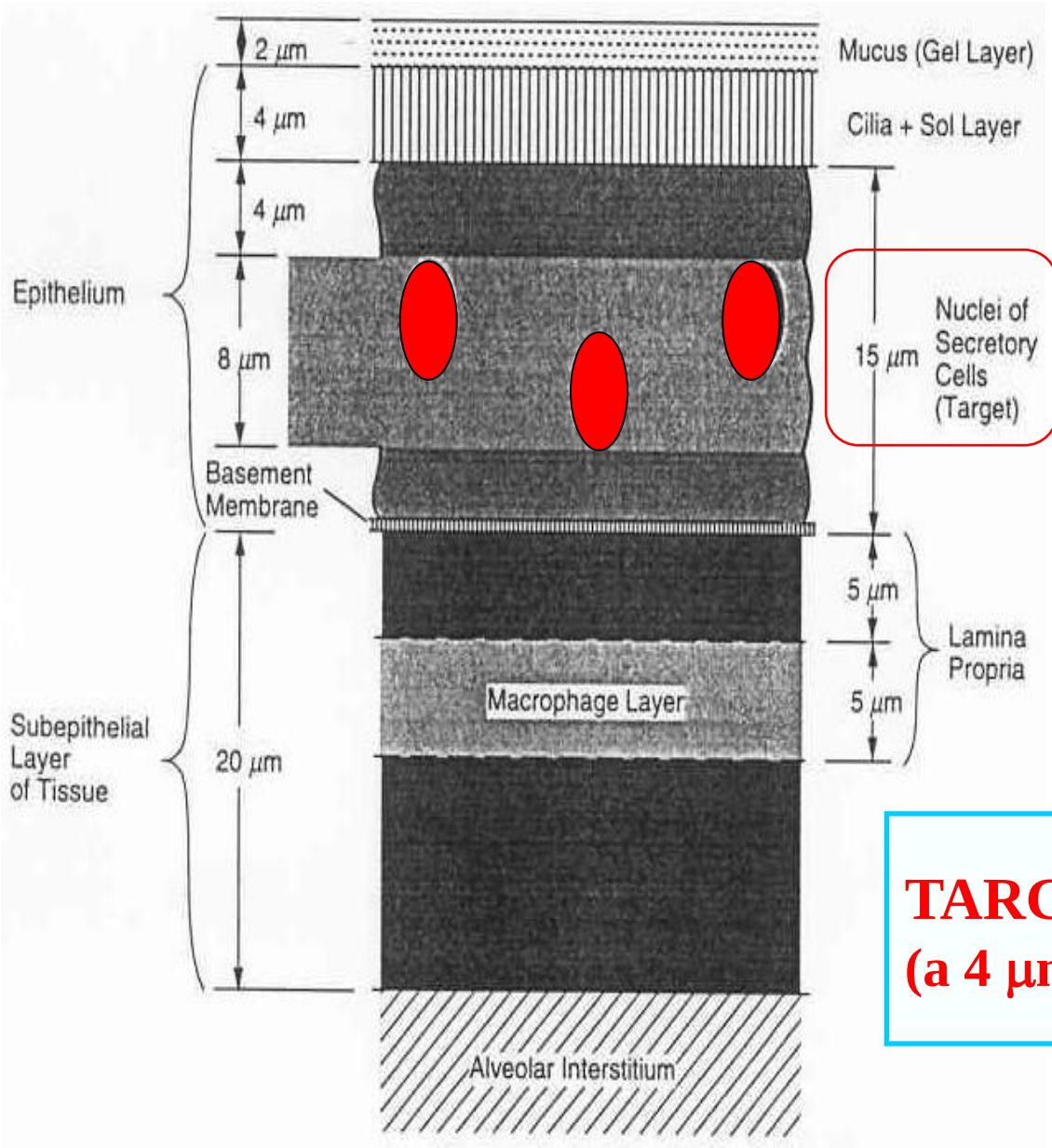


Tessuti Toracici (BB)



TARGET: -<u>cellule di secrezione</u>
(a 10 μm sotto l' epitelio ciliato)
-<u>cellule basali</u> *(a 35 μm)*

Tessuti Toracici (bb)



TARGET: cellule di secrezione (a 4 μm sotto epitelio ciliato).

DEPOSIZIONE

valutare la frazione di particelle inalate **che vengono depositate in ciascun compartimento, considerando un ampio range di dimensioni** ***(da dimensioni atomiche 0.6 nm a grandi aerosol AMAD 100 μm - in ICRP 30AMAD 0.2 - 10 μm)***

Modellizzazione deposizione particelle → **Approccio semiempirico**

DEPOSIZIONE

valutare la frazione di particelle inalate **che vengono depositate in ciascun compartimento, considerando un ampio range di dimensioni** ***(da dimensioni atomiche 0.6 nm a grandi aerosol AMAD 100 μm - in ICRP 30AMAD 0.2 - 10 μm)***

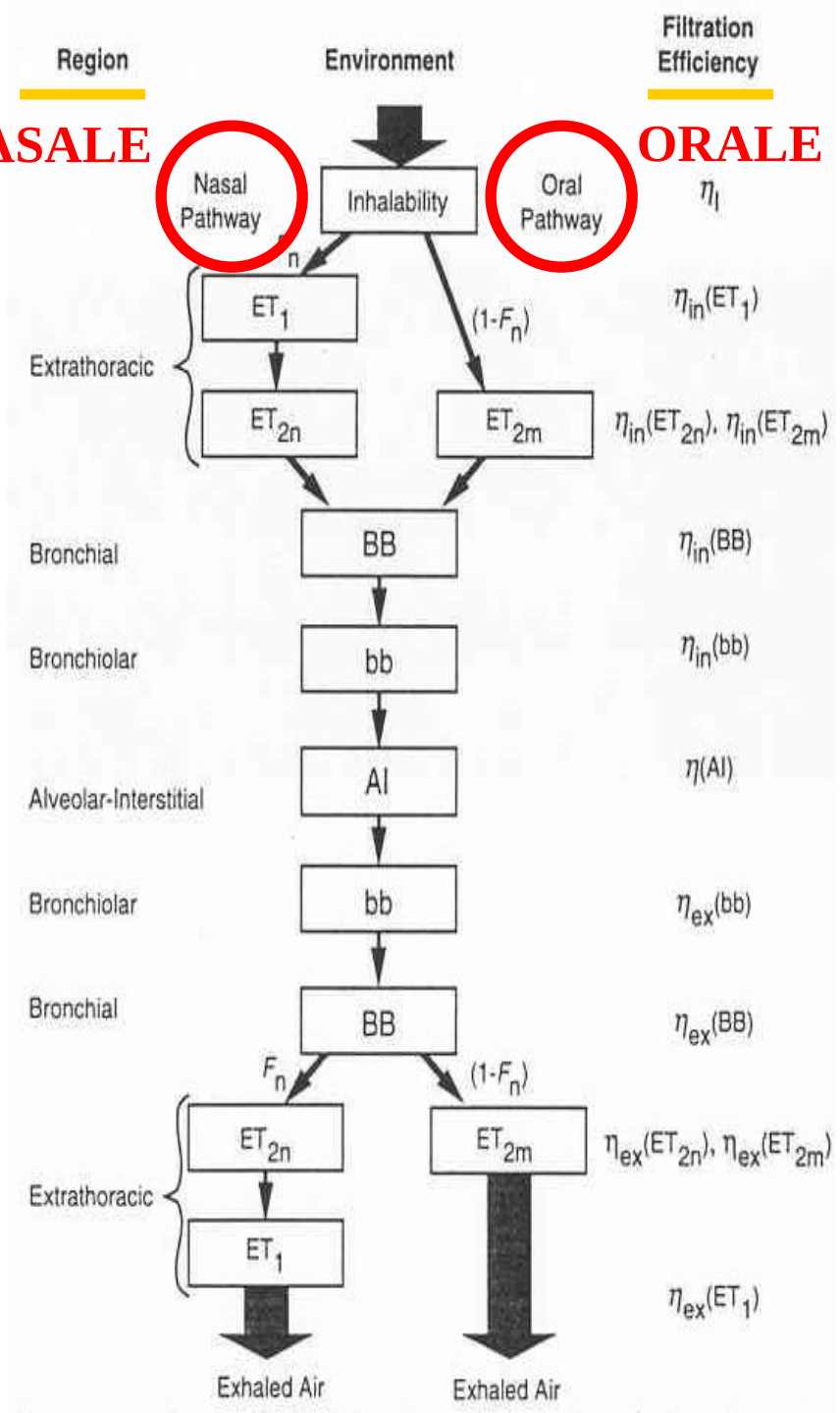
Modellizzazione deposizione particelle → **Approccio semiempirico**

- **Regione ET** 'APPROCCIO EMPIRICO' **(deposizione correlata alle caratteristiche fisiche delle particelle e al flusso d'aria**
- **Regione Toracica** 'APPROCCIO TEORICO' **con la valutazione di effetti combinati di trasporto (convezione, diffusione)**

Ogni regione è rappresentata da:

ν_j: volume del filtro
η_j: efficienza del filtro a rimuovere le particelle
ϕ_j: frazione di aria che raggiunge il filtro j
DE_j frazione di particelle inalate depositate in j

DEPOSIZIONE segue



DEPOSIZIONE segue

Processi di deposizione tengono conto di:

TRASPORTO AERODINAMICO η_{ae}

(per AMAD > 0.5 μm)

Processi di impatto e movimento per gravitazione

TRASPOSRTO TERMODINAMICO η_{th}

(per AMAD < 0.5 μm)

Processi di diffusione

i due processi sono competitivi

$$\eta_j = \sqrt{\eta_{ae}^2 + \eta_{th}^2}$$

Una componente di materiale è supposta depositata per gravità/inerzia [d_{ae} (μm)] e una componente per effetti termodinamici, diffusione [d_{th} (μm)]

DEPOSIZIONE segue

Processi di deposizione tengono conto di:

Processi di impatto e movimento per gravitazione

Processi di diffusione

i due processi sono competitivi

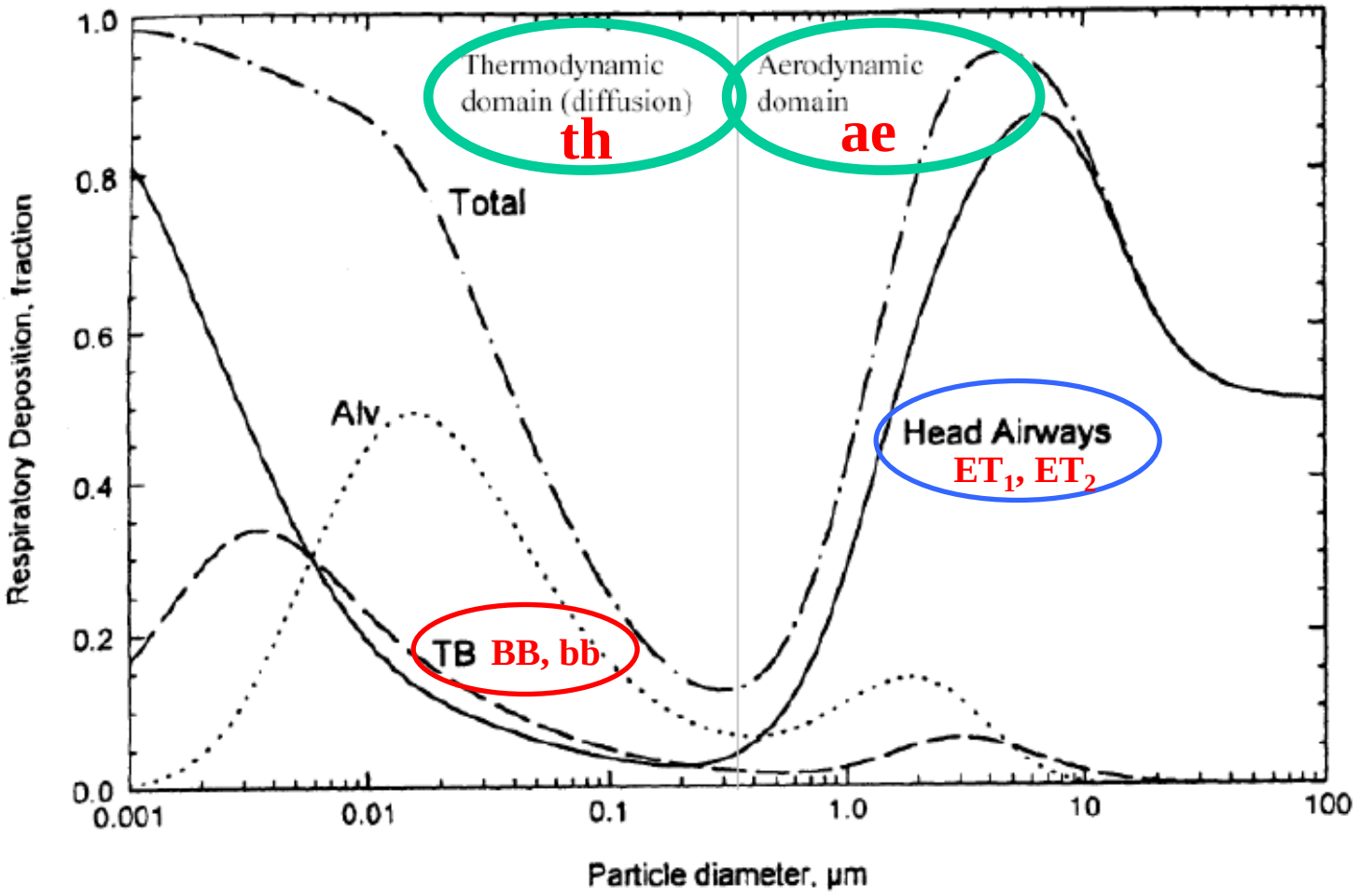
$$\eta_j = \sqrt{\eta_{ae}^2 + \eta_{th}^2}$$

Una componente di materiale è supposta depositata per gravità/inerzia **[d_{ae} (μm)] e una componente per effetti termodinamici,** diffusione **[d_{th} (μm)]**

d_{ae} (μm), diametro di una particella di densità unitaria che ha la stessa velocità di sedimentazione in aria della particella di interesse.

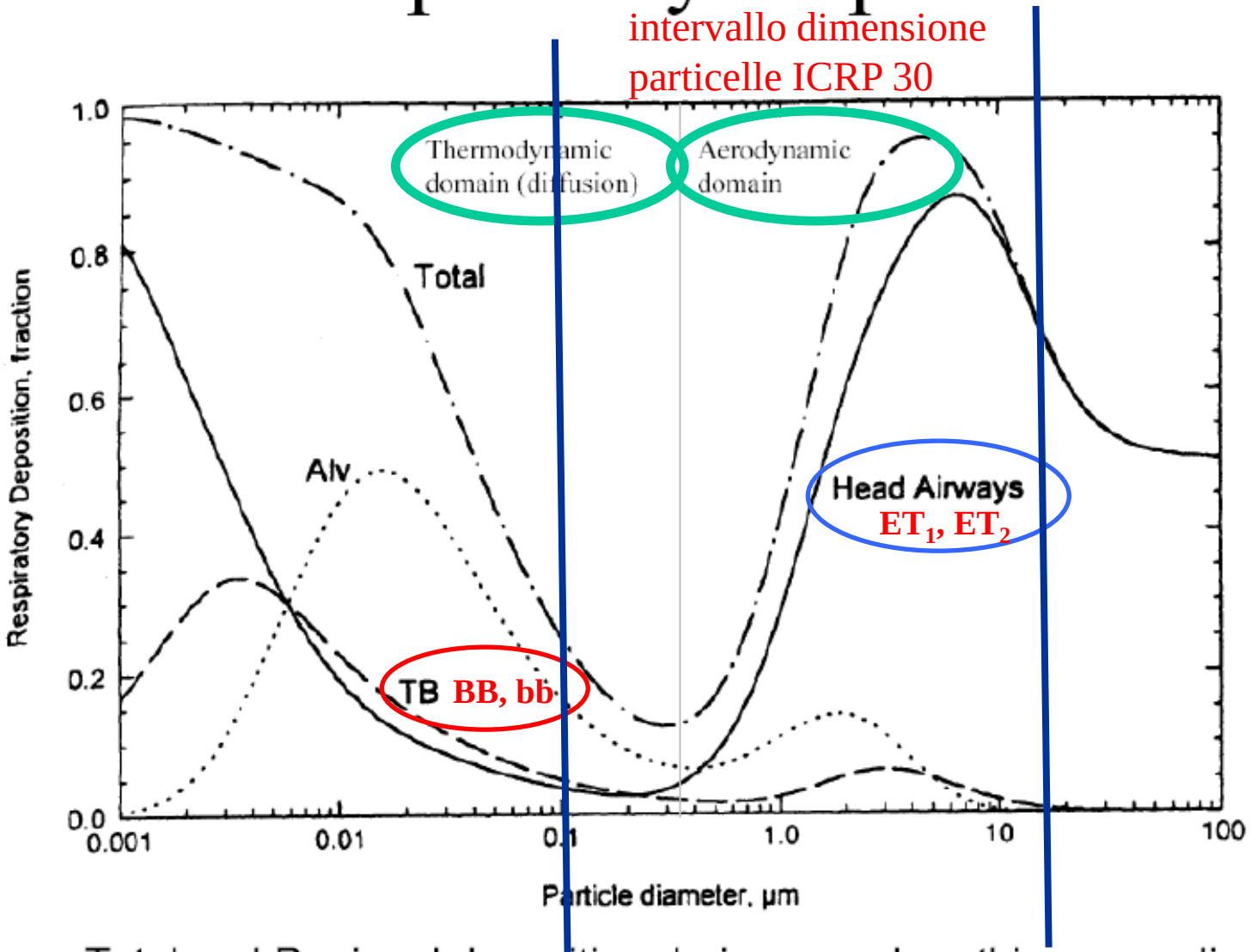
d_{th} (μm), diametro di una particella che ha lo stesso coefficiente di diffusione in aria della particella di interesse.

ICRP Respiratory Deposition Model



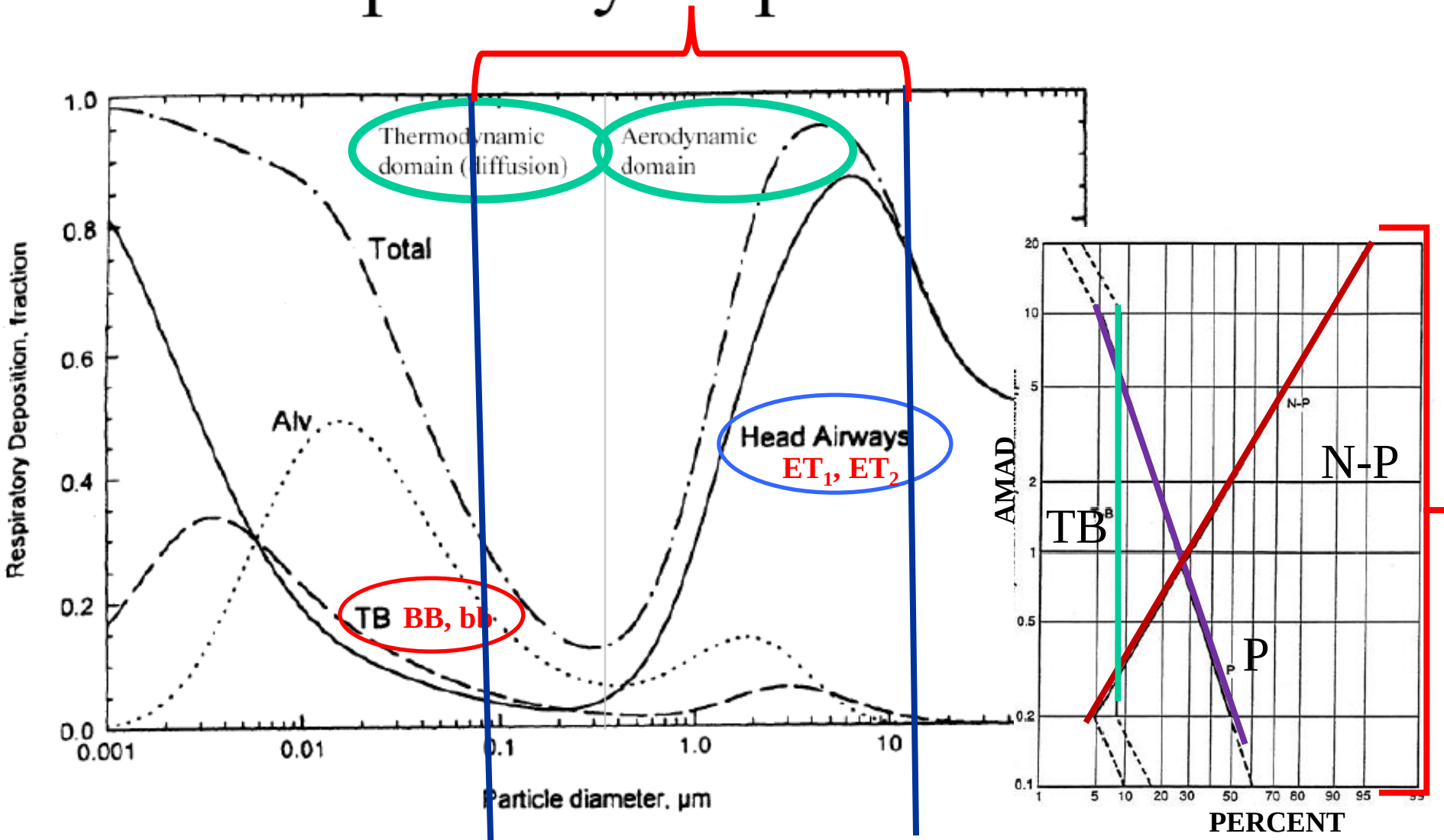
Total and Regional deposition during nose breathing according to ICRP 1994, light exercise.

ICRP Respiratory Deposition Model



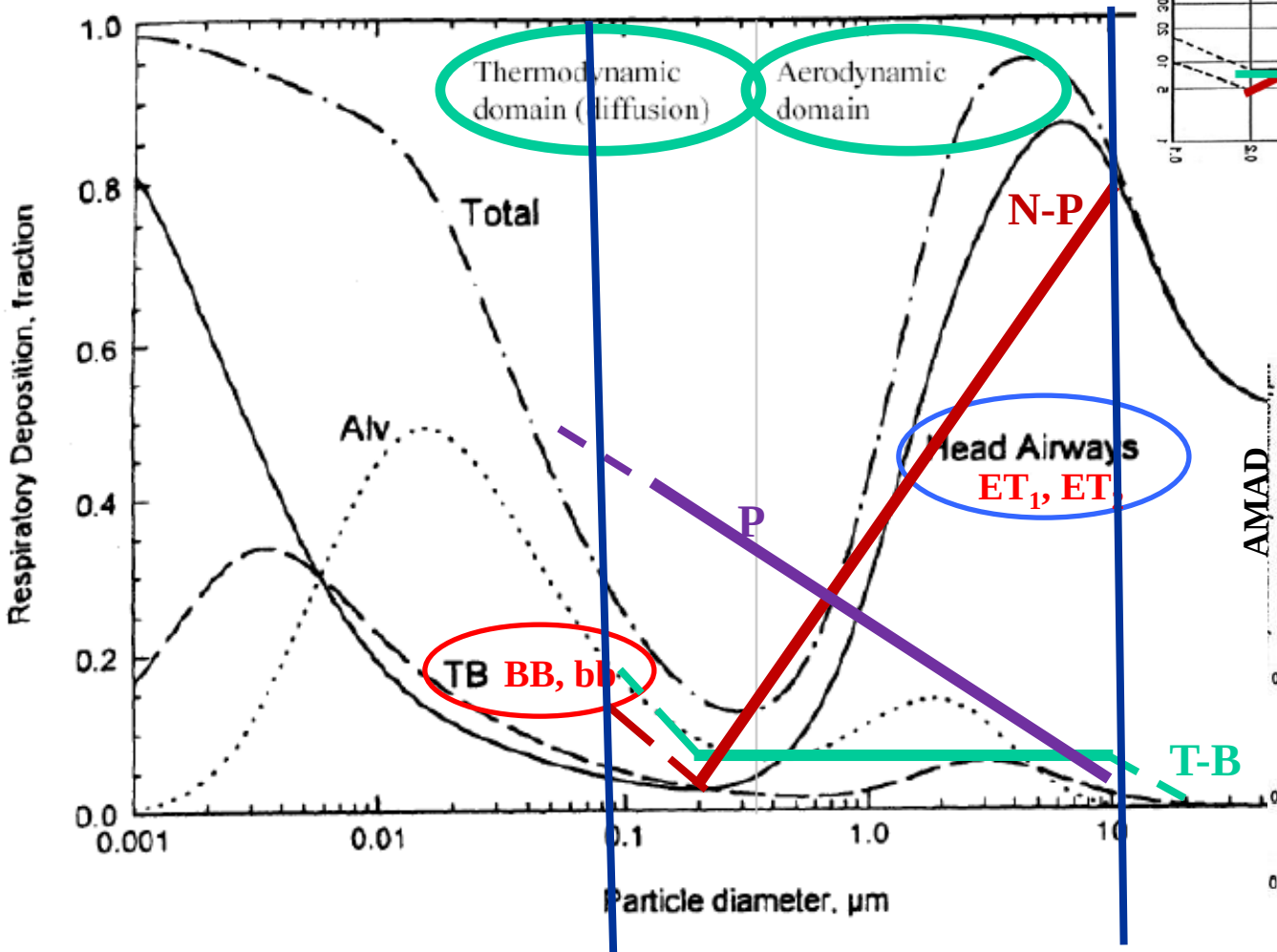
Total and Regional deposition during nose breathing according to ICRP 1994, light exercise.

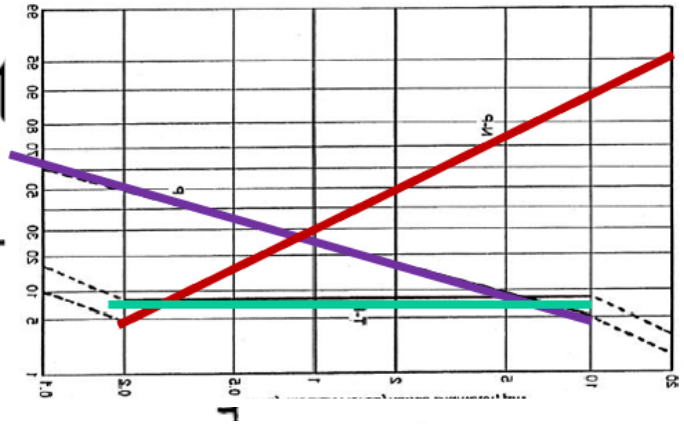
ICRP Respiratory Deposition Model

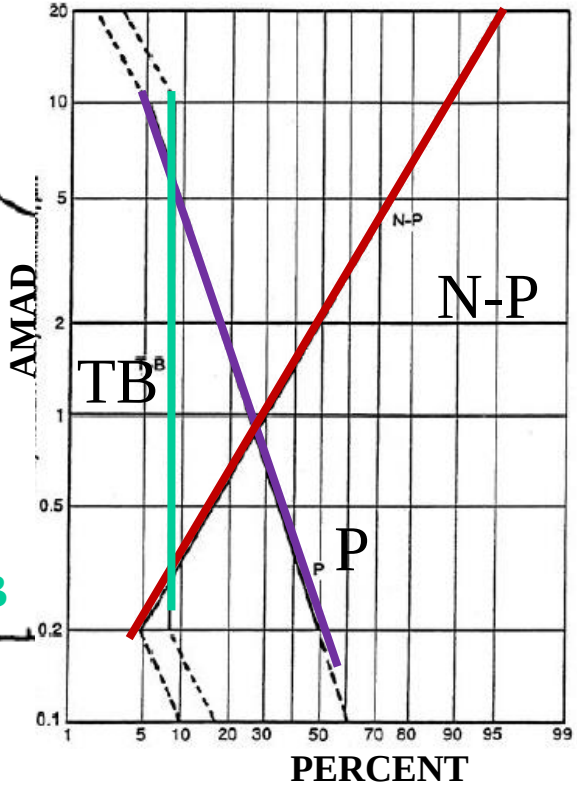


Total and Regional deposition during nose breathing according to ICRP 1994, light exercise.

ICRP Respiratory Deposit







Total and Regional deposition during nose breathing according to ICRP 1994, light exercise.

CLEARANCE

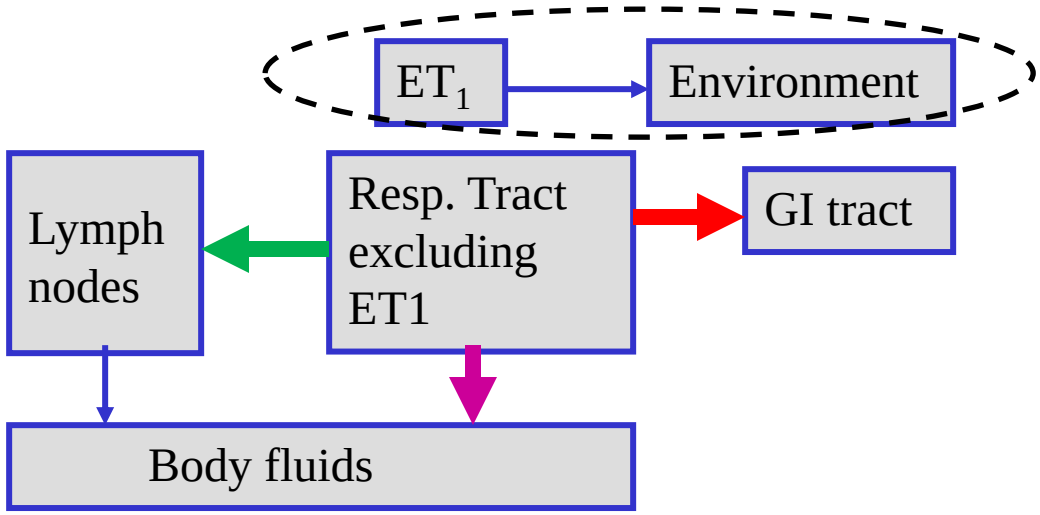
ASSORBIMENTO nel SANGUE: processo relativo alla dissociazione di particelle, all'assorbimento di sostanze solubili.

TRASPORTO DI PARTICELLE : processo di spostamento di materiale da una parte all'altra del sistema respiratorio; coinvolge generalmente trasporto di materiale corpuscolare.

CLEARANCE

TRASPORTO DI PARTICELLE : **processo di spostamento di materiale da una parte all'altra del sistema respiratorio;** coinvolge generalmente trasporto di materiale corpuscolare.

ASSORBIMENTO nel SANGUE: processo relativo alla dissociazione di particelle, all'assorbimento di sostanze solubili.



Il modello descrive le diverse vie di clearance dal tratto respiratorio che coinvolgono tre processi generali (trasporto verso GI, verso linfonodi e assorbimento). Da ET_1 rimozione secondo modalità intrinseche.

La clearance è determinata dalla forma chimica e i ratei di clearance si assumono indipendenti da età e sesso.

Le cinetiche di clearance sono espresse in termine di dR/dt, ratei frazionari :

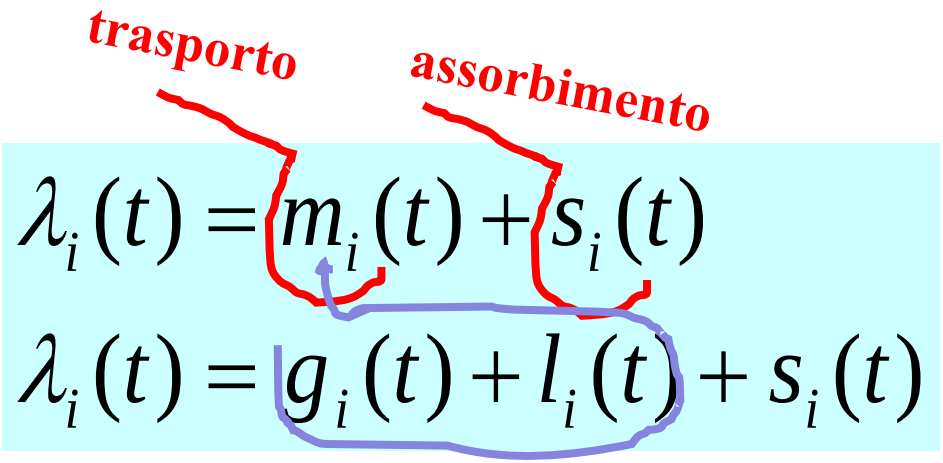
$$\frac{dR_i(t)}{dt} = -\lambda_i(t)R_i(t) + \lambda_{ji}(t)R_j(t)$$

$R_i(t)$ **è la quantità di materiale nella regione *i* (ET2, BB, bb, AI) al tempo *t* dopo l'introduzione**

$\lambda_i(t)$ **è il rateo di clearance di materiale dalla regione *i***

$\lambda_{ji}(t)$ **è il rateo di clearance di materiale <u>da</u> ogni regione *j* <u>verso</u> *i***

Si assume che i ratei di clearance dovuti al trasporto e all'assorbimento sono indipendenti



$m_i(t),\ s_i(t)$

ratei di clearance dalla regione i dovuti a trasporto **e** assorbimento**,**

$g_i(t),\ l_i(t)$

ratei di trasporto verso GI **e** verso regione linfonodi**.**

CLEARANCE segue

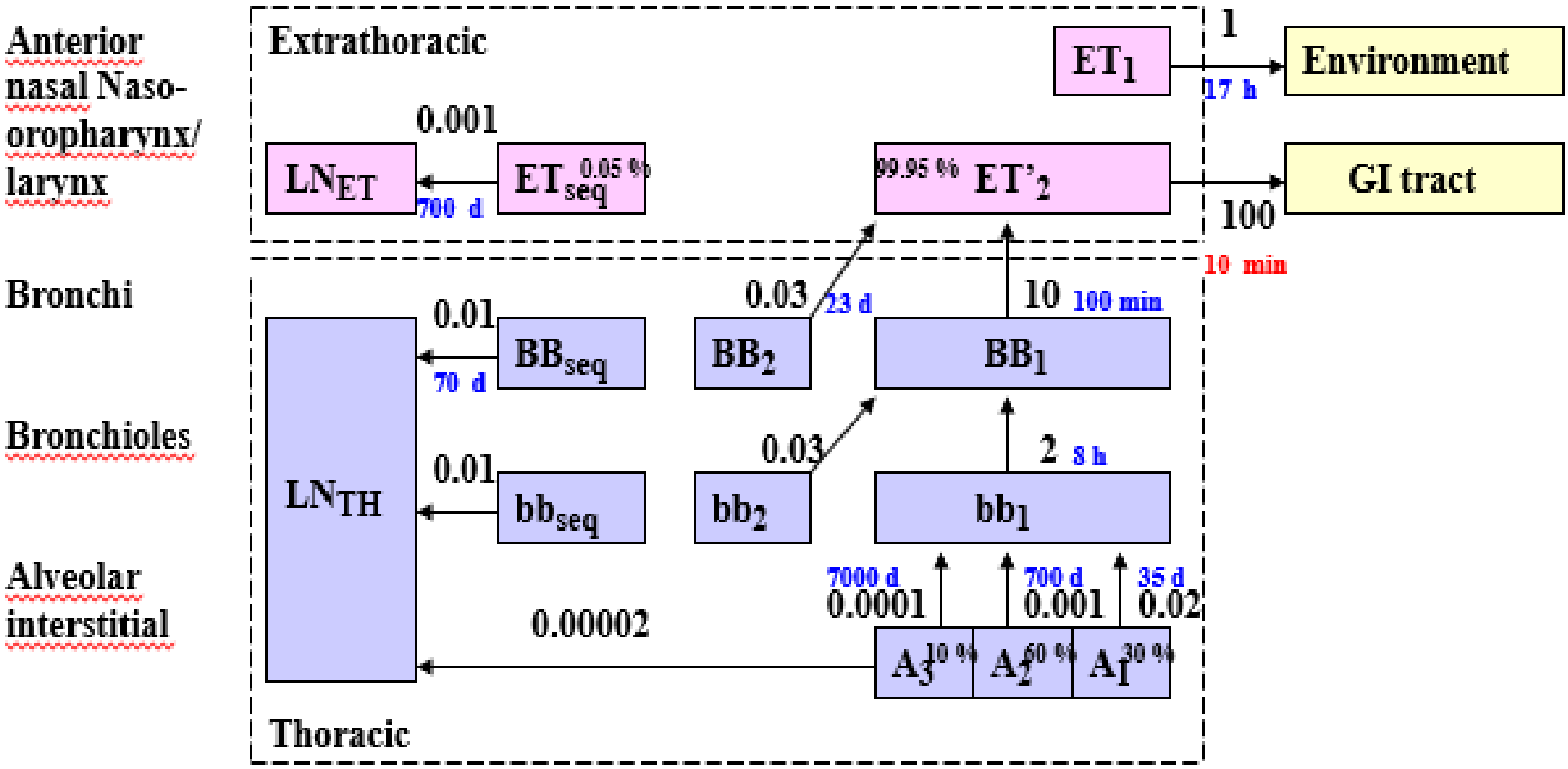
In generale i ratei di clearance da ciascuna regione cambiano con il tempo dopo l'intake. I ratei $\lambda_i(t)$ e le sue componenti dipendono dall'andamento iniziale della **deposizione**, dall'andamento del tempo dell'**intake**, e del **trasporto** da altre regioni verso i.

La clearance da ogni regione è rappresentata nel modello di una combinazione di compartimenti, ognuno dei quali rilascia a rateo costante in modo che la clearance totale approssimi la richiesta di dipendenza dal tempo.

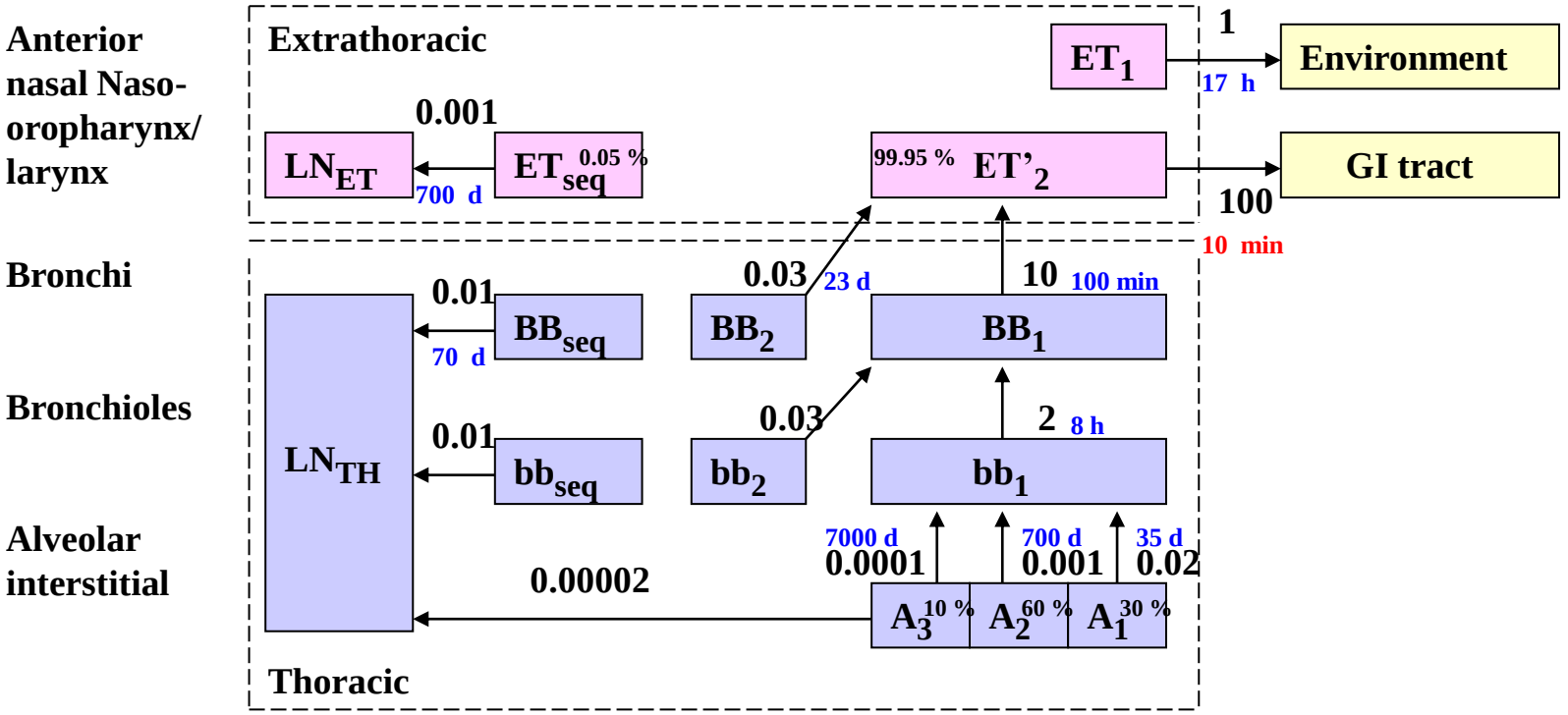
segue

FIGURA che segue (14 compartimenti) modello compartimentale del trasporto, dipendente dal tempo, delle particelle da ogni regione. I ratei sono espressi in d^{-1}.

CLEARANCE segue



CLEARANCE segue



- il deposito in AI diviso fra AI 1, 2 e 3 nel rapporto 0.3: 0.6: 0.1
- la frazione del deposito in BB e bb che viene rilasciata lentamente (ovvero BB2 e bb2 rispetto ai BB1 e bb1) è il 50% delle particelle di dimensioni < 2.5 um e decresce con diametri >2.5 um e la frazione ritenuta nelle pareti delle vie aeree (BBseq e bbseq) è il 0.7 % per tutte le dimensioni
- 0.05% del materiale dep in ET2 è ritenuto nelle sue pareti (ETseq) ed il resto nel compartimento ET2' che rilascia rapidamente verso il GI tract

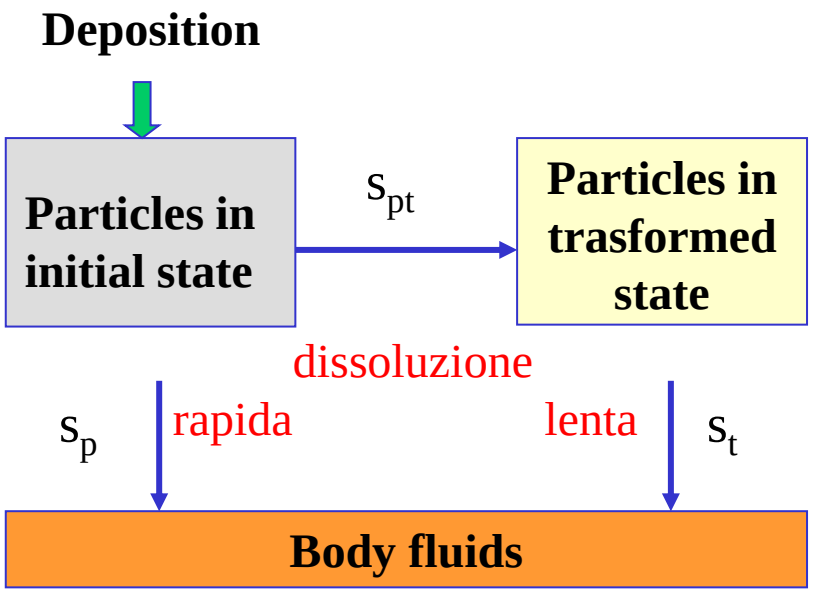
CLEARANCE segue

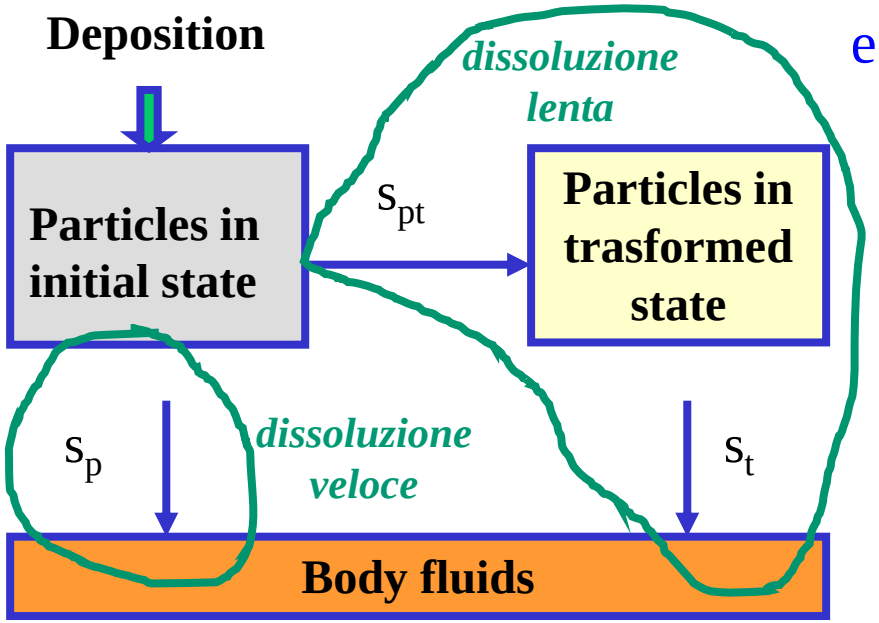
L'assorbimento nella circolazione dipende dalla forma chimica e fisica del materiale depositato, ma avviene allo stesso rateo in tutte le regioni, inclusi i linfonodi eccetto ET1.

L'assorbimento è un processo a due stadi: dissoluzione + assorbimento (uptake)



CLEARANCE (dissoluzione)

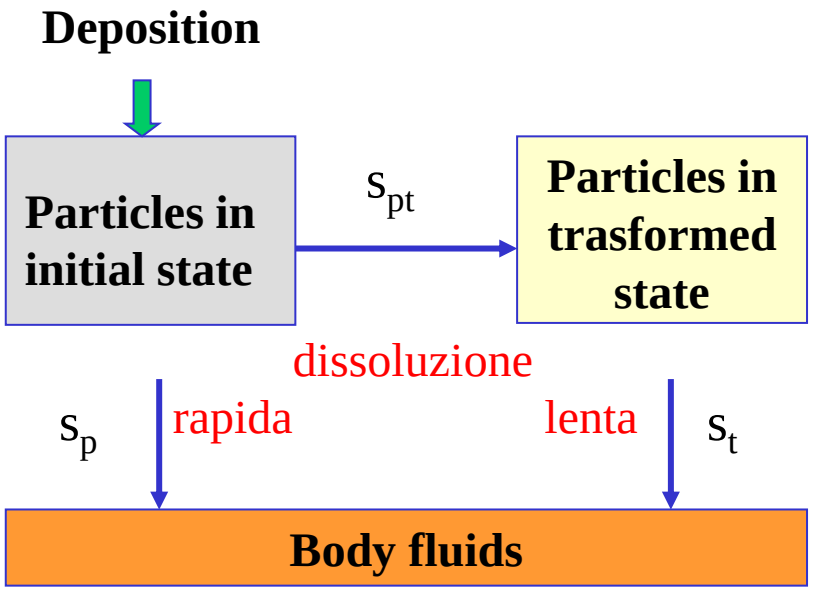




La clearance associata con entrambe le fasi può essere dipendente dal tempo. **Il modo più semplice** per rappresentare una **dissoluzione dipendente dal tempo** è assumere che una frazione del deposito sia dissolta rapidamente (S_p) ed il resto più lentamente (S_t).

DISSOLUZIONE processo caratterizzato da 2 ratei di dissoluzione, uno rapido (S_p) e uno più lento (S_t)

CLEARANCE (dissoluzione)



La clearance associata con entrambe le fasi può essere dipendente dal tempo. **Il modo più semplice** per rappresentare una **dissoluzione dipendente dal tempo** è assumere che una frazione del deposito sia dissolta rapidamente (S_p) ed il resto più lentamente (S_t).

DISSOLUZIONE processo caratterizzato da 2 ratei di dissoluzione, uno rapido (S_p) e uno più lento (S_t)

Figura – modello compartimentale per dissoluzione dipendente dal tempo, seguita da un assorbimento istantaneo. Il rapporto Sp/Spt approssima la frazione che dissolve rapidamente.

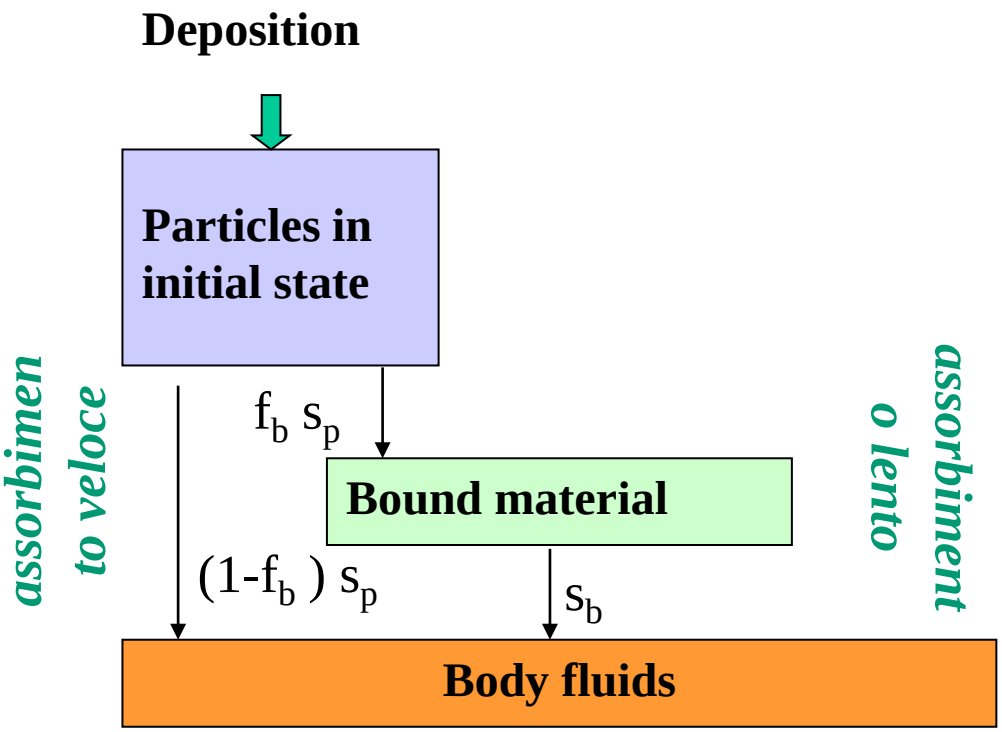
Questo modello è da intendersi applicato ad ognuno dei compartimenti (eccetto ET1) del precedente modello per il trasporto di particelle.

CLEARANCE (uptake)

UPTAKE:
processo caratterizzato da una frazione ad **assorbimento veloce, simultaneo ($1-f_b$)** e da una frazione ad **assorbimento lenta (f_b)** .

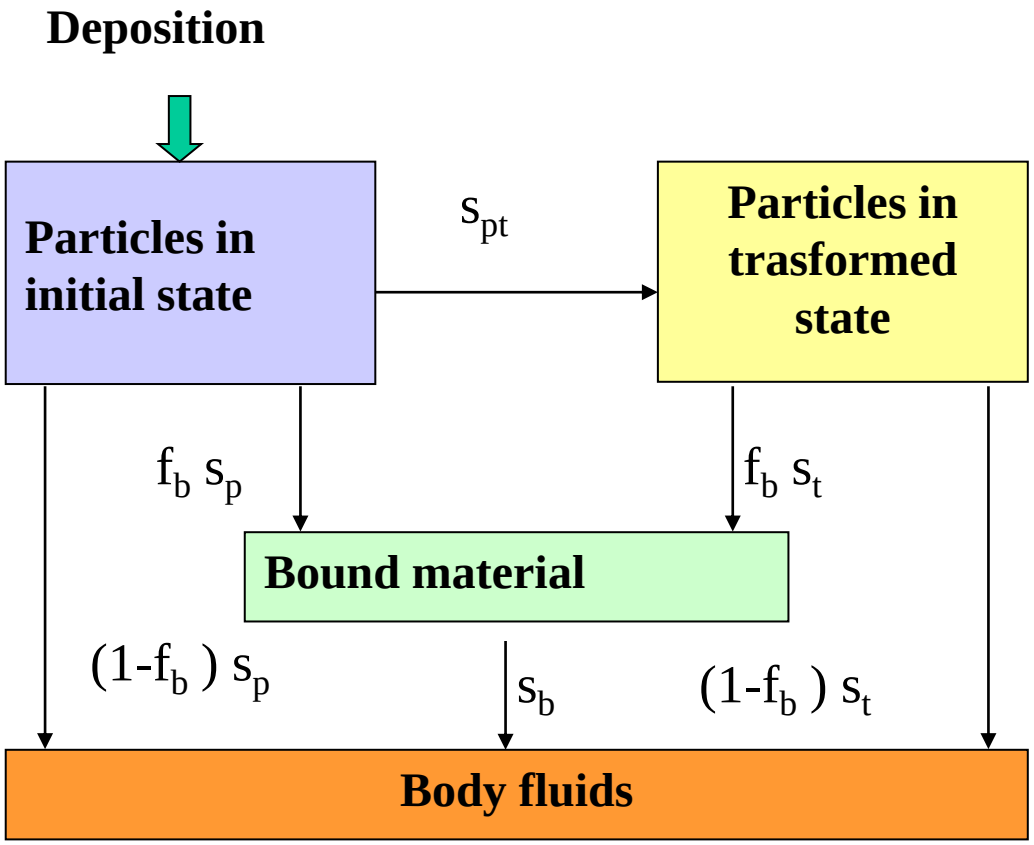
f_b: frazione di materiale disciolto che è prima trattenuto in uno stato legato

($1-f_b$): frazione del materiale disciolto assorbito istantaneamente.



CLEARANCE (ASSORBIMENTO)

ASSORBIMENTO = DISSOLUZIONE + UPTAKE



Modello compartimentale completo del assorbimento dipendente dal tempo.

Valori di riferimento per s_p s_{pt} s_t *da associare alla forma chimico-fisica*

CLEARANCE

Rateo di assorbimento dipende da forma chimico-fisica delle particelle

Tipo F-veloce

-100% dell'assorbimento con $T_{1/2}$ ~10 min

-Quasi tutto il materiale in BB, bb e AI viene assorbito rapidamente e 50% di quello in ET2 (il rimanente è trasportato nel GI)

Tipo M-moderato

- 90% assorbito con $T_{1/2}$=140d; 10% con $T_{1/2}$=10 min.

-Rapido assorbimento di 10% del depositato in BB e in bb; 5% del depositato in ET2;70% del depositato in AI

Tipo S-lento

-99.9%assorbito con $T_{1/2}$ =7000d; 0.1% con $T_{1/2}$ ~ 10 min

- Poco assorbito da ET, BB, e bb; ~10% da AI

La classificazione D, W, Y è ora sostituita da F, M, S

CLEARANCE

Rateo di assorbimento dipende da forma chimico-fisica delle particelle

Tipo F-veloce

-100% dell'assorbimento con $T_{1/2}$ ~10 min

-Quasi tutto il materiale in BB, bb e AI viene assorbito rapidamente e 50% di quello in ET2 (il rimanente è trasportato nel GI)

Tipo M-moderato

- 90% assorbito con $T_{1/2}$=140d; 10% con $T_{1/2}$=10 min.

-Rapido assorbimento di 10% del depositato in BB e in bb; 5% del depositato in ET2;70% del depositato in AI

Tipo S-lento

-99.9%assorbito con $T_{1/2}$ =7000d; 0.1% con $T_{1/2}$ ~ 10 min

- Poco assorbito da ET, BB, e bb; ~10% da AI

La classificazione D, W, Y è ora sostituita da F, M, S

Valori di riferimento per i parametri per composti tipo F, M e S.

	F (fast)	M	S (slow)
s_p (d^{-1}) T1/2	100 10 min	10 100 min	0.1 7 d
s_{pt}(d^{-1}) T1/2	0	90 11 min	100 10 min
s_t(d^{-1}) T1/2	-	0.005 140 d	0.0001 7000 d

CLEARANCE

Età, malattie, agenti farmacologici, e inquinamento possono modificare i ratei di clearance ?

Table 19. Proposed modifying factors for the compartment model to represent particle transport from the human respiratory tract

Modifying factor	Φ_m Bronchial region (BB) $m_{7,11}$ (BB_1 to ET_2)	Φ_m Bronchiolar region (bb) $m_{4,7}$ (bb_1 to BB_1)
Age (after 60 y)	0.6	(0.6)[a]
Sleep	0.3	0.3
Asthma	0.7	0.7
Bronchial carcinoma	0.3	0.3
Chronic bronchitis	0.5	(0.5)
Cystic fibrosis	0.5	(0.5)
Immotile cilia syndrome	0.1	(0.1)
Immunoglobulin deficiency	0.4	(0.4)
Influenza	0.2	(0.2)
Kartagener's syndrome	0.1	(0.1)
Mycoplasma pneumonia	0.3	(0.3)
Atropine	0.1	0.1
β-adrenergic agent	2	2
Cigarette smoke (acute)	1	2
Cigarette smoking	0.5	1
Sulphuric acid	1	0.7

	Alveolar-interstitial region (AI)		
	a_1[b]	$m_{2,4}$ (AI_2 to bb_1)	$m_{3,4}$ (AI_3 to bb_1)
Cigarette smoking	0.3	0.7	0.7

[a] Values in parentheses are adopted by analogy with BB.
[b] Fraction of AI deposits that go to AI_1 (see Table 17B).

GAS e VAPORI

Per i radionuclidi inalati in forma di 'particolato', l'ingresso e la deposizione nelle diverse regioni del tratto respiratorio è governata dalla distribuzione in dimensioni della particelle dell'aerosol.

Per gas e vapori la deposizione invece è specifica per il materiale

Classe SR-0 insolubili e non reattivi: deposizione trascurabile

Classe SR-1 solubili o reattivi: può avvenire la deposizione attraverso il tratto respiratorio. Possono irraggiare tutte le vie aeree. Domina l'attività assorbita nella circolazione. In assenza di informazioni è assunto il 100% di deposizione (10% in ET1 + 20% ET2 + 10% BB + 20 % bb +40% AI). Se è nota una deposizione totale diversa del 100% si indica una deposizione locale nelle stesse proporzioni e una distribuzione interna in BB (o bb) nei tre compartimenti (BB1, BB2, Bbseq) come 0.493 : 0.5 : 0.007.

Classe SR-2 altamente solubili o reattivi: deposizione totale nelle vie extratoraci-che ET2. I composti tipo V della Publ. 30 (assunti traslocati alla circolazione senza cambiamenti nella forma chimica) sono classificati SR-2.

DOSIMETRIA DEL TRATTO RESPIRATORIO

valutare le dosi in ciascuno dei tessuti del tratto respiratorio potenzialmente a rischio

TARGET : <u>cellule nell'epitelio di ciascuna regione delle vie aeree</u> (la dose ai tessuti contenenti queste cellule è presa come la dose alla regione).

$$H_{ET} = H_{ET_1}\ A_{ET_1} + H_{ET_2}\ A_{ET_2} + H_{LN_{ET}}\ A_{LN_{ET}}$$

$$H_{TH} = H_{BB}\ A_{BB} + H_{bb}\ A_{bb} + H_{AI}\ A_{AI} + H_{LN_{TH}}\ A_{LN_{TH}}$$

La dose alla regione ET o TH è la somma delle dosi di ogni regione, pesata per la radiosensibilità.

A_i, frazione di w_T, indipendenti da sesso e età

DOSIMETRIA DEL TRATTO RESPIRATORIO

$$H_{ET} = H_{ET_1}\ A_{ET_1} + H_{ET_2}\ A_{ET_2} + H_{LN_{ET}}\ A_{LN_{ET}}$$

$$H_{TH} = H_{BB}\ A_{BB} + H_{bb}\ A_{bb} + H_{AI}\ A_{AI} + H_{LN_{TH}}\ A_{LN_{TH}}$$

ORGANO	REGIONE	A_i
Vie ET	ET_1	0.001
	ET_2	0.998
	LN_{ET}	0.001
Vie toraciche (polmoni)	BB	0.333
	bb	0.333
	AI	0.333
	LN_{TH}	0.001

Il fattore di peso w_T = 0.12 specifico per i polmoni è applicato a H_{TH} per calcolare la dose efficace.